



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2013

**NUNO FILIPE
ARAÚJO
FERNANDES**

**COMPORTAMENTO DO BETÃO COM
METACAUULINO PORTUGUÊS**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2013

**NUNO FILIPE
ARAÚJO
FERNANDES**

COMPORTAMENTO DO BETÃO COM METACAUULINO PORTUGUÊS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Doutor Eduardo Jorge Marques de Oliveira Ferraz

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo
professor auxiliar da Universidade do Minho

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutor Eduardo Jorge Marques de Oliveira Ferraz
equiparado a professor adjunto, Instituto Politécnico de Tomar, Escola Superior de Tecnologia de Tomar

agradecimentos

Quero apresentar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho, em particular:

Aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Velosa e Doutor Eduardo Ferraz, pela orientação, apoio e disponibilidade que sempre demonstraram, bem como os conhecimentos transmitidos ao longo deste estudo.

À Eng. Maria Carlos e ao Vitor do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, por todo o apoio e auxílio prestado ao longo de toda a campanha experimental.

Aos meus amigos pelo incentivo e motivação.

Aos meus pais, Joaquim e Conceição, pelo apoio incondicional, pela paciência e pelo incentivo que sempre me deram ao longo destes anos.

Obrigado!

palavras-chave

metacaulino, caulino, resistência à compressão, módulo de elasticidade, cloretos, Portugal

resumo

O presente trabalho tem como objetivo principal determinar a viabilidade da utilização de metacaulino português na construção. Pretende-se realizar uma comparação efetiva das características mecânicas entre betões com um metacaulino português experimental, betões com um metacaulino comercial e betões sem qualquer metacaulino. Para isso foi levada a cabo uma campanha experimental que consistiu no fabrico de betão em laboratório, em que o cimento foi substituído em 10% e 20% por cada metacaulino. De forma a comparar o seu desempenho, foi realizado um programa de ensaios para a determinação da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e da resistência à penetração de cloretos. Neste estudo é apresentada uma avaliação aos resultados obtidos, da qual é seguro afirmar que a substituição parcial do cimento por metacaulino aumenta significativamente o desempenho do betão e que o metacaulino português é uma verdadeira mais valia para a construção em Portugal.

keywords

metakaolin, kaolin, compressive strength, modulus of elasticity, chloride, portugal

abstract

The present study aims to verify the viability of using portuguese metakaolin in construction. It is intended to compare the mechanical properties between concrete with a portuguese metakaolin, concrete with a commercial metakaolin and concrete without metakaolin. Therefore, an experimental campaign was carried out consisting in laboratory concrete prodution, where cement was replaced by 10% and 20% of each metakaolin. In order to compare its performance, several tests were made to determine compressive strength, modulus of elasticity and chloride penetration resistance. This study presents an assessment of the obtained results, where it's safe to assume that the partial replacement of portland cement by metakaolin, increases concrete performance and portuguese metakaolin is an important asset to portuguese construction.

Índice

1.	Introdução	7
2.	Metacaulino – Produção e caraterísticas	8
2.1.	Caulinite	8
2.1.1.	Propriedades	8
2.2.	Caulino	9
2.2.1.	Caulinos residuais ou primários	10
2.2.2.	Caulinos sedimentares ou secundários	11
2.2.3.	Depósitos de caulino em Portugal	12
2.3.	Metacaulino	13
2.3.1.	Formação do metacaulino por calcinação	13
2.3.2.	Propriedades	13
3.	Utilização de metacaulino em betão	15
4.	Materiais e métodos	19
4.1.	Materiais	19
4.1.1.	Metacaulino “Argical-M 1000” (MTK1000)	19
4.1.2.	Metacaulino português (MKP)	19
4.1.3.	Cimento	19
4.1.4.	Agregados	20
4.1.5.	Superplastificante (SP)	20
4.2.	Formulação das composições	20
4.2.1.	Método de Faury	20
4.2.2.	Preparação do betão	22
4.3.	Métodos de ensaio	23
4.3.1.	Baridade dos materiais	23
4.3.2.	Massa volúmica real dos materiais	25

4.3.3.	Ensaio ultra sónico – Pundit.....	27
4.3.4.	Ensaio de resistência à compressão	29
4.3.5.	Carbonatação do betão	31
4.3.6.	Ensaio de penetração de cloretos no betão.....	32
5.	Caracterização dos materiais	37
5.1.	Metacaulino	37
5.1.1.	Metacaulino “Argical-M 1000” (MTK1000).....	37
5.1.2.	Metacaulino português (MKP).....	39
5.2.	Cimento.....	41
5.3.	Agregados	42
5.3.1.	Brita 12/25.....	42
5.3.2.	Brita 8/12.....	43
5.3.3.	Areia.....	45
5.4.	Superplastificante.....	46
6.	Avaliação do comportamento do betão	48
6.1.	Avaliação da resistência do betão à compressão	48
6.1.1.	Comparação dos betões.....	48
6.1.2.	Evolução ao longo do tempo.....	51
6.2.	Estimativa do módulo de elasticidade estático e dinâmico.....	54
6.3.	Avaliação da penetração de cloretos no betão	58
6.3.1.	Calibração	58
6.3.2.	Avaliação do teor de cloretos.....	59
7.	Conclusão	66
	Referências bibliográficas	68

Lista de Figuras

Figura 1 – Caulinite	9
Figura 2 - Caulino.....	10
Figura 3 - Localização geográfica dos caulinos em Portugal).....	12
Figura 4 - Resistência à compressão do betão para cura de 3 dias.....	16
Figura 5 - Resistência à compressão do betão para cura de 28 dias.....	16
Figura 6 - Resistência à compressão do betão para cura de 60 dias).....	17
Figura 7 - Absorção de água (WA) ao longo do tempo para betões com metacaulino	17
Figura 8 – Variação da expansão do betão sujeito á exposição de sulfato	18
Figura 9 - Pundit.....	27
Figura 10 - Calibração Pundit.....	28
Figura 11 - Ensaio Pundit	29
Figura 12 - Máquina ensaio compressão	29
Figura 13 - Registo carga máxima de compressão	30
Figura 14 - Roturas satisfatórias.....	30
Figura 15 - Rotura provete cúbico.....	31
Figura 16 - Cubo com fenolftaleína.....	31
Figura 17 - Cubos fatiados	32
Figura 18 - Almofariz	34
Figura 19 - Moínho de anéis de aço	34
Figura 20 - Peneiro	35
Figura 22 - Filtro	35
Figura 21 - Fervura.....	35
Figura 23 - Analisador multi parâmetros.....	36
Figura 24 - Brita 12/25	43
Figura 25 - Brita 8/12	45
Figura 26 – Areia.....	46
Figura 27 – Ábaco módulo de elasticidade	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades físicas do metacaulino	13
Tabela 2 - Composição química do metacaulino.....	14
Tabela 3 - Resistência à flexão do betão para diferentes conteúdos de metacaulino	15
Tabela 4 - Quantidade superplastificante	21
Tabela 5 – Composição do betão.....	22
Tabela 6 - Baridade dos materiais	24
Tabela 7 - Massa volúmica.....	27
Tabela 8 - Composição água do mar sintética.....	33
Tabela 9 - Composição química	37
Tabela 10 - Características físicas	38
Tabela 11 - Características físicas	39
Tabela 12 - Composição química MKP	40
Tabela 13 - Peneiração a seco Brita 12/25	42
Tabela 14 - Peneiração a seco Brita 8/12	44
Tabela 15 - Peneiração a seco da areia	45
Tabela 16 - Dados técnicos "Sika ViscoCrete 3008"	47
Tabela 17 - Tensão de compressão.....	48
Tabela 18 - Módulo elasticidade	56
Tabela 19 - Resultados calibração	59
Tabela 20 - Quantificação de cloretos na fatia interior	60
Tabela 21 - Quantificação de cloretos na fatia do meio	61
Tabela 22 - Quantificação de cloretos na fatia exterior.....	63

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Composição do betão - Método de Faury	22
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica MTK1000.....	38
Gráfico 3 - Composição mineralógica MTK1000.....	39
Gráfico 4 - Curva de distribuição granulométrica do MKP	40
Gráfico 5 - Composição mineralógica MKP	41
Gráfico 6 - Curva de distribuição granulométrica da Brita 12/25	43
Gráfico 7 - Curva de distribuição granulométrica da Brita 8/12	44
Gráfico 8 - Curva de distribuição granulométrica da areia	46
Gráfico 9 - Tensão de compressão a 28 dias	49
Gráfico 10 - Tensão de compressão a 90 dias	50
Gráfico 11 - Tensão de compressão a 180 dias	51
Gráfico 12 - Resistência à compressão com 0% MTK.....	52
Gráfico 13 - Resistência à compressão com 10% MTK1000.....	52
Gráfico 14 - Resistência à compressão com 20% MTK1000.....	53
Gráfico 15 - Resistência à compressão com 10% MKP	53
Gráfico 16 - Resistência à compressão com 20% MKP	54
Gráfico 17 - Módulo elasticidade estático a 28 dias.....	56
Gráfico 18 - Módulo elasticidade dinâmico a 28 dias	56
Gráfico 19 - Módulo elasticidade estático a 90 dias.....	57
Gráfico 20 - Módulo de elasticidade dinâmico a 90 dias	57
Gráfico 21 - Módulo elasticidade estático a 180 dias.....	57
Gráfico 22 - Módulo elasticidade dinâmico a 180 dias	57
Gráfico 23 - Curva de calibração.....	59
Gráfico 24 - Comparação de cloretos para diferentes composições na fatia interior	60
Gráfico 25 - Comparação de cloretos para diferentes composições na fatia do meio.....	62
Gráfico 26 - Comparação de cloretos para diferentes composições na fatia exterior	63
Gráfico 27 - Teor de cloretos por fatia	64

1. Introdução

Desde muito cedo na história do Homem que a utilização de materiais com propriedades cimentíceas toma um papel de importante relevo na construção. Conhecidas as limitações do cimento Portland, torna-se imperativo redescobrir todos esses materiais que poderão ser uma verdadeira alternativa ao mesmo, podendo até contribuir para uma melhoria energética, mecânica e de resistência às agressões do meio, de produtos derivados do cimento como betões e argamassas.

O desenvolvimento de novos ligantes provindos da calcinação do caulino é um passo importante para colmatar essas limitações. Estes garantem a mesma qualidade de desempenho, permitindo uma redução de CO₂, poupando assim o meio ambiente a agressões excessivas (Gonçalves et al. 2009).

Prevê-se num futuro próximo que a produção de cimento Portland terá de ser limitada a cerca de 1000 milhões de toneladas devido a questões de ordem energética e ambiental, sendo que os 3500 milhões de toneladas necessários para a procura estimada na altura serão preenchidos por 850 milhões de toneladas de adições como cinzas volantes, escórias, entre outras, e os restantes 1650 milhões de toneladas serão colmatados com metacaulino (Sampaio et al. 2001). Confirma-se assim a enorme importância que os ligantes obtidos por calcinação do caulino terão no desenvolvimento de betões e argamassas, visto que estes permitem ainda a utilização de uma gama muito mais variada de agregados. Estes materiais conferem uma maior resistência mecânica, maior durabilidade e atingem patamares de desempenho mais rapidamente do que materiais fabricados com cimento Portland (Pinto 2004).

Tendo em conta que a qualidade do produto final depende das características dos materiais iniciais, torna-se importante saber que matéria-prima há disponível em Portugal para a obtenção de ligantes por calcinação do caulino. Sabendo que no nosso país existem vários jazigos de caulino situados numa faixa granítica entre Viana do Castelo e Peniche, e que estes mesmos não variam muito a sua composição química de local para local, tornam-se assim extremamente viáveis para uma eventual utilização no processamento de ligantes, ajudando ao facto que estes trazem excelentes vantagens no comportamento, desempenho e impacto ambiental, sem qualquer aumento de custos.

2. Metacaulino – Produção e características

2.1. Caulinite

A caulinite é um mineral de argila e é também o principal constituinte do caulino. Esta pode estar presente entre valores que rondam os 10% e os 95%, dependendo da proveniência do caulino (Sampaio 2006).

2.1.1. Propriedades

De acordo com o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (www.lneg.pt) estas são as principais características da caulinite:

- **Fórmula química:** $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- **Classe:** Silicatos
- **Dureza:** 1,5 a 2,5
- **Cor:** Branco; Amarelado; Cinzento esverdeado; Incolor
- **Risca:** Branco
- **Transparência:** Transparente e translúcido
- **Brilho:** Gorduroso; Nacarado; Baço
- **Densidade:** 2,6
- **Clivagem:** Perfeita segundo a face
- **Fractura:** Irregular
- **Hábito:** Pulverulento; Cristalino; Terroso
- **Sistema Cristalino:** Triclínico
- **Forma dos cristais:** Plaquetas, por vezes pseudo-hexagonais
- **Ocorrência:** Abundante
- **Génese:** Secundária (como resultado da alteração de feldspatos e outros minerais silicatados ricos em alumínio)

- **Paragénese:** Fluorite; Microclina; Pirite; Hemimorfite; Augite; Quartzo; Moscovite; Montemorilonite



Figura 1 – Caulinite (e-geo.ineti.pt)

2.2. Caulino

O caulino é uma argila especial de cor branca (Figura 2), constituída principalmente por caulinite, um mineral argiloso do subgrupo do caulino. Associados à caulinite podem surgir outros minerais argilosos deste mesmo subgrupo, assim como minerais argilosos do subgrupo da ilite. Em geral, juntamente a estes, surgem outros minerais não argilosos como quartzo, feldspato, mica, turmalina, goethite e anatase (Gomes 2002).

Esta argila específica, o caulino, é bastante abundante no nosso planeta. Existem muitos depósitos desta, variando a sua composição mineralógica de depósito para depósito, chegando ao ponto de não existirem dois iguais.

O caulino pode provir de depósitos do tipo residual ou do tipo sedimentar, dependendo da sua localização original. Se este se encontra no local onde originalmente se formou, é denominado de depósito residual ou primário, caso contrário, se este já sofreu operações de transporte pela ação da água ou vento, é denominado de depósito sedimentar ou secundário (Meira 2001). O rendimento do caulino, ou seja, o real aproveitamento deste, varia entre 10% a 25% para depósitos residuais, valor consideravelmente baixo, o

que obriga normalmente a tratamentos de beneficiação para melhorar o seu teor em caulinite. Após este enriquecimento, o caulino pode chegar a valores de 95% de aproveitamento. Já no caso de depósitos sedimentares o rendimento deste caulino pode rondar valores da ordem dos 85% a 95% (Vasconcelos 2008).

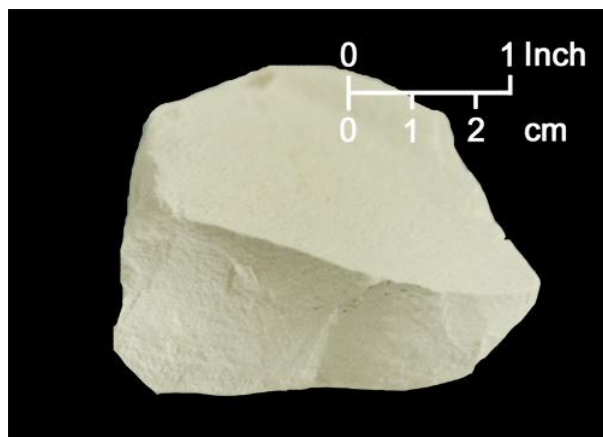


Figura 2 - Caulino (www.dep.state.fl.us)

2.2.1. Caulinos residuais ou primários

A formação de caulinos residuais pode ter origens distintas. O processo de caulinização pode resultar de um mecanismo de alteração meteórico, hidrotermal ou mesmo pela ação dos dois mecanismos no mesmo depósito.

A expressão química simples que traduz o processo de caulinização atuante sobre feldspatos alcalinos é a seguinte (Gomes 2002):



2.2.1.1. Ação meteórica

Esta ação e a sua intensidade dependem muito da textura e composição da rocha mãe, assim como da topografia do terreno, do clima e da densidade e natureza da vegetação existente. A meteorização envolve normalmente fluidos meteóricos a baixas

temperaturas (até 40 °C) e ocorrem, em geral, perto da superfície. Os efeitos desta podem verificar-se até profundidades de 100 m (Gomes 2002).

2.2.1.2. Ação hidrotermal

A ação hidrotermal ocorre quando fluidos quentes pertencentes ao magma, ou mesmo águas aquecidas por este, atacam quimicamente os minerais constituintes das rochas. Esta ação provoca permutações de elementos químicos entre rochas e fluidos. À medida que este processo se vai desenvolvendo, outras soluções aquosas como águas meteóricas e fluidos presentes em fraturas podem entrar no sistema, sendo aquecidas com a profundidade. Desta forma, a rocha vai ficando cada vez mais fragilizada e fraturada, permitindo assim a caulinização por meteorização. Este processo pode também ser denominado de alteração hidrotermal/meteórica, visto que estes dois processos são dificilmente desassociados (Vasconcelos 2008).

É importante realçar que a ação hidrotermal por si só, apenas acontece quando o depósito de caulino está relacionado com solfataras. Aqui, rochas vulcânicas ácidas são caulinizadas por ação de fluidos sulfurosos (Gomes 2002).

2.2.2. Caulinos sedimentares ou secundários

Os depósitos de caulinos sedimentares situam-se normalmente perto de grandes maciços graníticos, gneisses ou migmatitos que em certo período da sua história geológica foram submetidos a grandes ações de meteorização. Este caulino foi transportado em suspensão e aí depositado por ação das águas e vento.

Os caulinos sedimentares apresentam, em regra, dimensões das partículas mais pequenas do que os caulinos residuais, assim como um maior teor de impurezas devido à erosão e transporte deste. Uma das principais características dos caulinos sedimentares é que estes apresentam níveis de caulinite geralmente superiores a 60% (Vasconcelos 2008).

2.2.3. Depósitos de caulino em Portugal

Os depósitos de caulino em Portugal compreendem apenas uma área bastante limitada que inclui uma estreita faixa litoral que vai de Viana do Castelo a Peniche, como demonstra a Figura 3, apesar dos imensos afloramentos graníticos existentes. Esses mesmos incluem depósitos do tipo residual, assim com do tipo sedimentar.

Dos depósitos de origem residual conhecidos em Portugal, apenas três são actualmente explorados: Alvarelhos (Trofa), Outeiro (S. Vicente de Pereira Jusã, Ovar) e Campados (Esposende). Relativamente a depósitos de origem sedimentar, estão de momento vários a ser explorados: Charrasqueira (Alvarães, Viana do Castelo), Barqueiros (Esposende), Sabrais (Peniche), Rio Maior, Alcanede (Pombal) e Meirinhas (Leiria) (Vasconcelos 2008).



Figura 3 - Localização geográfica dos caulinos em Portugal (Vasconcelos 2008)

2.3. Metacaulino

2.3.1. Formação do metacaulino por calcinação

O metacaulino é um material pozolânico artificial produzido pela calcinação de caulinos selecionados a temperaturas que rondam os 650 °C a 800 °C. O processo de produção é rigorosamente controlado e conseguem ser obtidos materiais com elevada reatividade e pureza (Gleize et al. 2007). Esta calcinação provoca uma desordem estrutural da caulinite por desidroxilação, beneficiando assim a formação do metacaulino. Este metacaulino tem características muito próximas dos ligantes derivados de pozolanas naturais e favorece ainda ao longo do tempo o endurecimento e capacidade ligante de argamassas e betões (Lourenço et al. 2006).

2.3.2. Propriedades

O metacaulino é constituído por partículas muito finas. Dessas mesmas partículas, 99,9% delas têm tamanho inferior a 16 µm, sendo que o seu tamanho médio ronda os 3 µm (Siddique and Klaus 2009).

As propriedades físicas do metacaulino são demonstradas na Tabela 1:

Tabela 1 - Propriedades físicas do metacaulino (www.metakaolin.com)

Propriedade	Valor
Peso Específico (g/cm³)	2,60
Densidade Volúmica (g/cm³)	0,4
Forma	Pó
Cor	Branca
Brilho	80-82

Na seguinte Tabela 2, mostra-se a típica composição química do metacaulino:

Tabela 2 - Composição química do metacaulino (www.metakaolin.com)

Elemento	% de massa
SiO₂	51,00 - 53,00
Al₂O₃	42,00 - 44,00
Fe₂O₃	< 2,20
TiO₂	< 3,00
SO₄	< 0,50
P₂O₅	< 0,20
CaO	< 0,20
MgO	< 0,10
Na₂O	< 0,05
K₂O	< 0,40
Outros	< 0,50

As funcionalidades do metacaulino estão hoje amplamente alargadas na construção civil, nomeadamente na substituição parcial do cimento Portland em argamassas e betões. Este pode ser usado em betões de alto desempenho, betões leves, betões pré-fabricados, produtos de fibrocimento, betões reforçados com fibra de vidro, argamassas, estuques e rebocos para piscinas, entre outros.

O uso do metacaulino quando em substituição de cimento Portland traz algumas vantagens para o desempenho de betões e argamassas (Siddique and Klaus 2009):

- Aumento da resistência à compressão e à flexão;
- Redução da permeabilidade;
- Aumento da resistência a ataques químicos;
- Maior durabilidade;
- Aumento da densidade do betão;
- Melhor trabalhabilidade e acabamentos do betão;
- Redução do potencial de eflorescências;
- Melhor aparência e cor;

3. Utilização de metacaulino em betão

O uso de metacaulino como substituto parcial do cimento Portland em betões tem sido investigado extensivamente nos últimos anos, tendo sido comprovado que este é realmente uma pozolana eficaz.

Tal como demonstra a Tabela 3, a incorporação de metacaulino faz melhorar as propriedades mecânicas ao longo do tempo. Neste caso específico, a resistência à flexão para o betão melhora consideravelmente com o aumento da percentagem de metacaulino (Qian and Li 2001).

Tabela 3 - Resistência à flexão do betão para diferentes conteúdos de metacaulino em MPa (Qian and Li 2001)

Idade (dias)	% Metacaulino			
	0%	5%	10%	15%
28	4,65	4,74	6,16	6,40
80	5,70	5,81	6,46	7,06

De acordo com as Figuras 4, 5 e 6, Qian and Li (2001) demonstra também que se verifica um aumento da resistência à compressão do betão à medida que as percentagens de metacaulino são maiores, principalmente para betões mais novos.

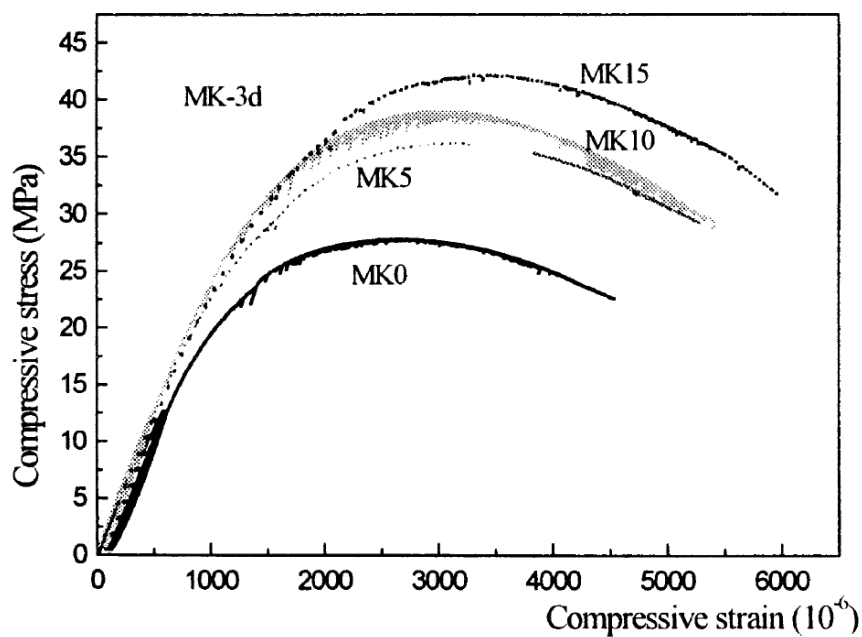


Figura 4 - Resistência à compressão do betão para cura de 3 dias (Qian and Li 2001)

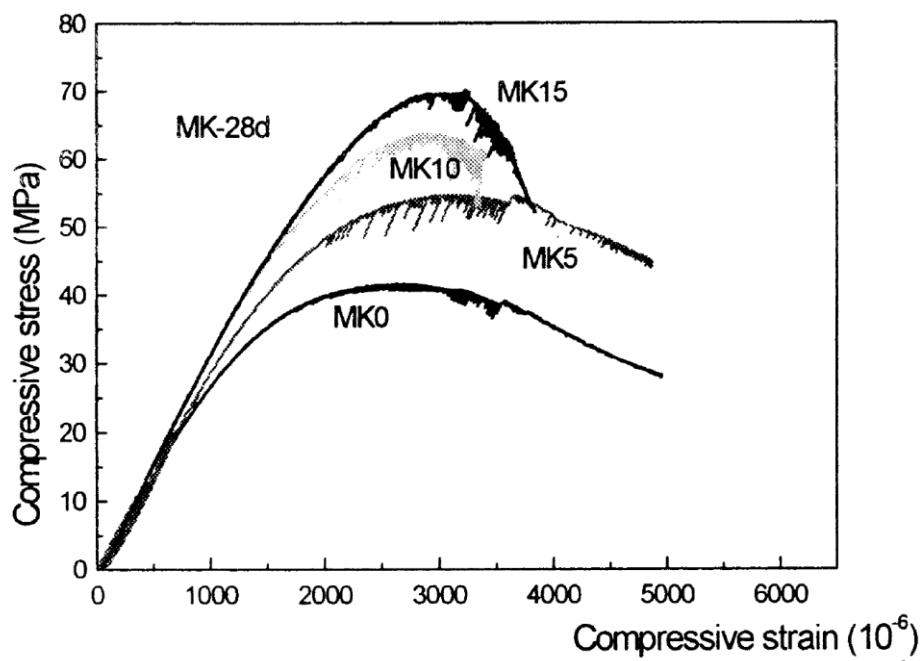


Figura 5 - Resistência à compressão do betão para cura de 28 dias (Qian and Li 2001)

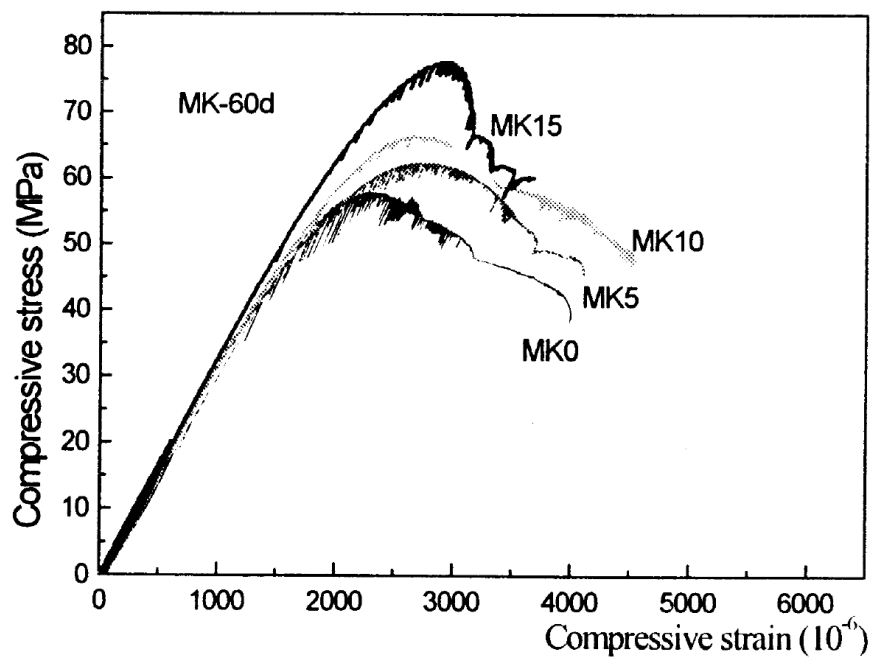


Figura 6 - Resistência à compressão do betão para cura de 60 dias (Qian and Li 2001)

O uso do metacaulino promove ainda a alteração da estrutura dos poros do betão, provocando um aumento da absorção de água. Na Figura 7, Khatib and Clay (2004) mostram isso mesmo.

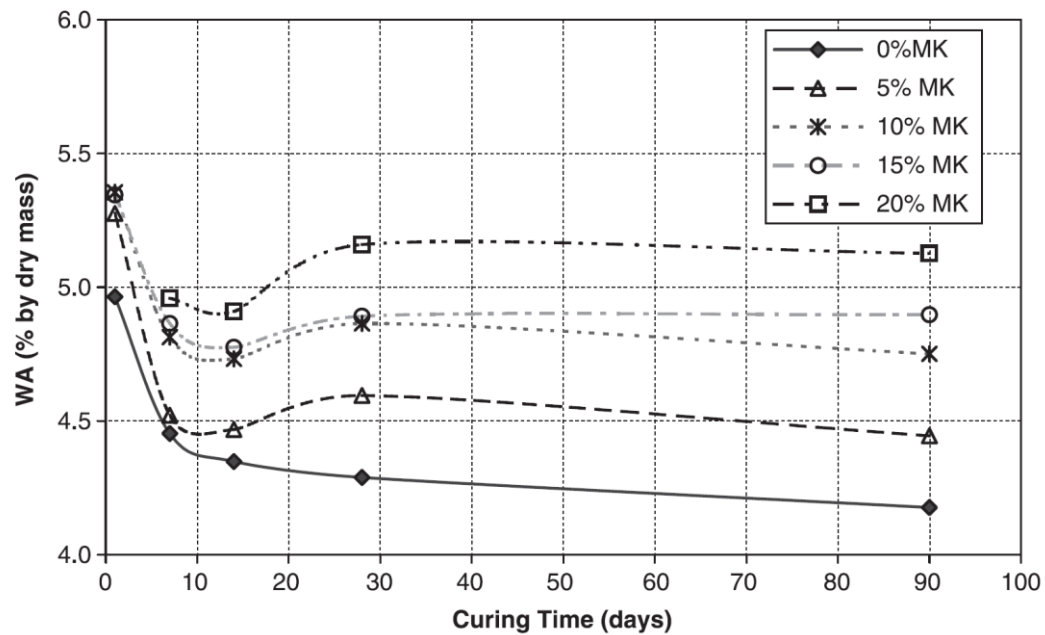


Figura 7 - Absorção de água (WA) ao longo do tempo para betões contendo metacaulino (Khatib and Clay 2004)

O ataque por sulfatos é uma das mais agressivas deteriorações que uma estrutura de betão pode sofrer. Este ataque leva a grandes expansões e mesmo ao aparecimento de enormes fendas que podem por em risco a segurança de qualquer estrutura de betão (Al-Akhras 2006). O uso do metacaulino aumenta consideravelmente a resistência a este tipo de ataque, sendo que quanto mais quantidade de metacaulino tiver a mistura, maior vai ser a sua resistência ao ataque de sulfatos. Al-Akhras (2006) realizou vários ensaios a betões com metacaulino em diferentes quantidades e comprovou esse mesmo melhoramento, como mostra a Figura 8.

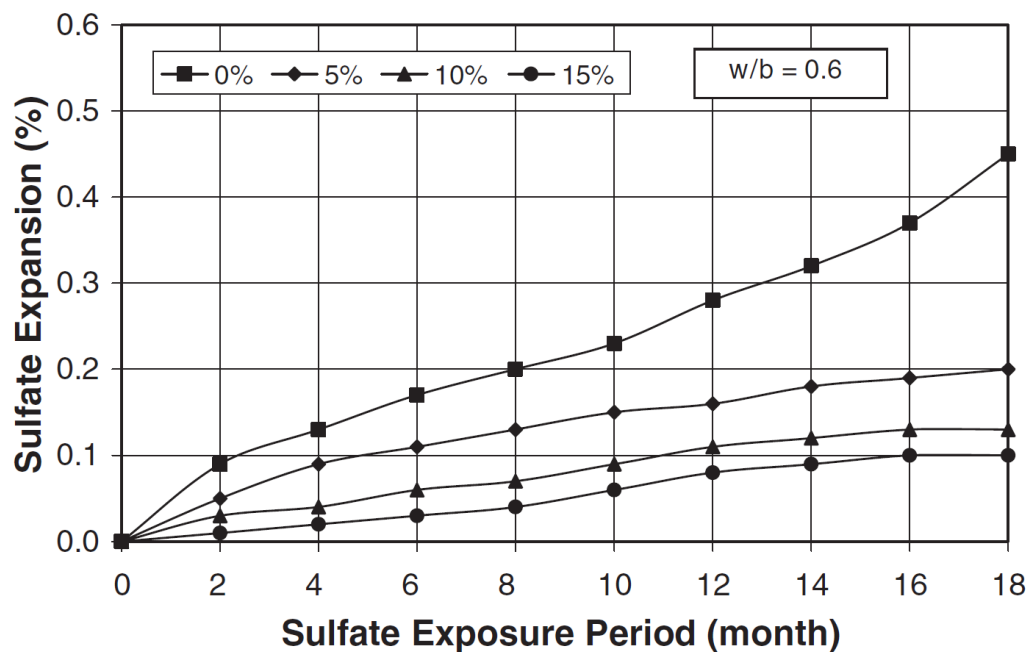


Figura 8 – Variação da expansão do betão sujeito á exposição de sulfato (Al-Akhras 2006)

4. Materiais e métodos

Para a realização dos trabalhos necessários foram utilizados diversos materiais como metacaulino “ARGICAL-M 1000”, metacaulino experimental português, cimento Portland CEM I 42,5R, duas britas, areia e superplastificante. Para esses mesmos materiais foram determinados experimentalmente a sua baridade, assim como a sua massa volúmica real.

4.1. Materiais

4.1.1. Metacaulino “Argical-M 1000” (MTK1000)

Este metacaulino da empresa francesa AGS é uma pozolana artificial, obtida da calcinação de uma argila caulinítica da baía de Charentes. O Argical-M 1000 é um produto comercial, podendo ser adquirido em qualquer estabelecimento de venda de produtos de construção.

4.1.2. Metacaulino português (MKP)

Este metacaulino é um material experimental, não comercial, resultante de uma parceria entre o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e uma empresa nacional que opera no ramo dos materiais de construção.

4.1.3. Cimento

Foi utilizado na execução das diversas misturas o cimento CEM I 42,5R da empresa CIMPOR. Este cimento é muito corrente e é utilizado na maioria das obras em betão de Portugal.

4.1.4. Agregados

Para a composição das misturas necessárias à realização deste trabalho, foram utilizados como agregados, duas britas, Brita 12/25 e Brita 8/12, assim como uma areia. Todos estes agregados foram fornecidos pelo Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (LabCIVIL).

4.1.5. Superplastificante (SP)

Em ordem a melhorar a trabalhabilidade das misturas e permitir uma redução da água de amassadura resolveu-se usar um superplastificante. Para a execução dos trabalhos o escolhido foi o “Sika ViscoCrete 3008”.

4.2. Formulação das composições

4.2.1. Método de Faury

As composições de betão foram todas calculadas recorrendo ao método de Faury. Este método permite calcular as percentagens em volume dos materiais constituintes. Baseia-se na elaboração de uma curva de referência que corresponde à consideração do agregado mais o cimento e é constituída por um segmento de reta. As ordenadas têm uma escala linear e as abcissas, que começam em 0,0065 mm, têm uma escala proporcional à raiz quinta das dimensões das partículas (Coutinho 1988).

A partir deste método foram testadas várias composições para quantidades de cimento que variaram entre 250 kg/m³ e 350 kg/m³ e uma razão de água/cimento de 0,5. Foi também adicionado um superplastificante (SP) de modo a melhorar a trabalhabilidade da mistura e reduzir a água de amassadura desta. A quantidade de superplastificante variou conforme a composição da mistura e esta foi aumentada com a adição de metacaulino devido a este ser um material mais fino. As quantidades de SP foram determinadas por

indicação do fabricante e estão dispostas na Tabela 4. Estas percentagens são sempre relativas à quantidade de cimento ou cimento mais metacaulino.

Tabela 4 - Quantidade superplastificante

Mistura	% SP
0% MTK	0,5
10% MTK1000	1,0
20% MTK1000	1,2
10% MKP	1,0
20% MKP	1,2

Tendo em conta o teste de abaixamento (slump test) e de forma a que o betão se enquadrasse na classe S3, que está compreendida entre 100 a 150 mm de abaixamento segundo a NP EN 206-1 (2007), foi escolhida uma quantidade de 350 kg de cimento por cada m³ de betão.

Tomadas todas as opções necessárias, através do método de Faury foi obtido o Gráfico 1, do qual se determinou as percentagens de cada constituinte da mistura demonstradas na Tabela 5.

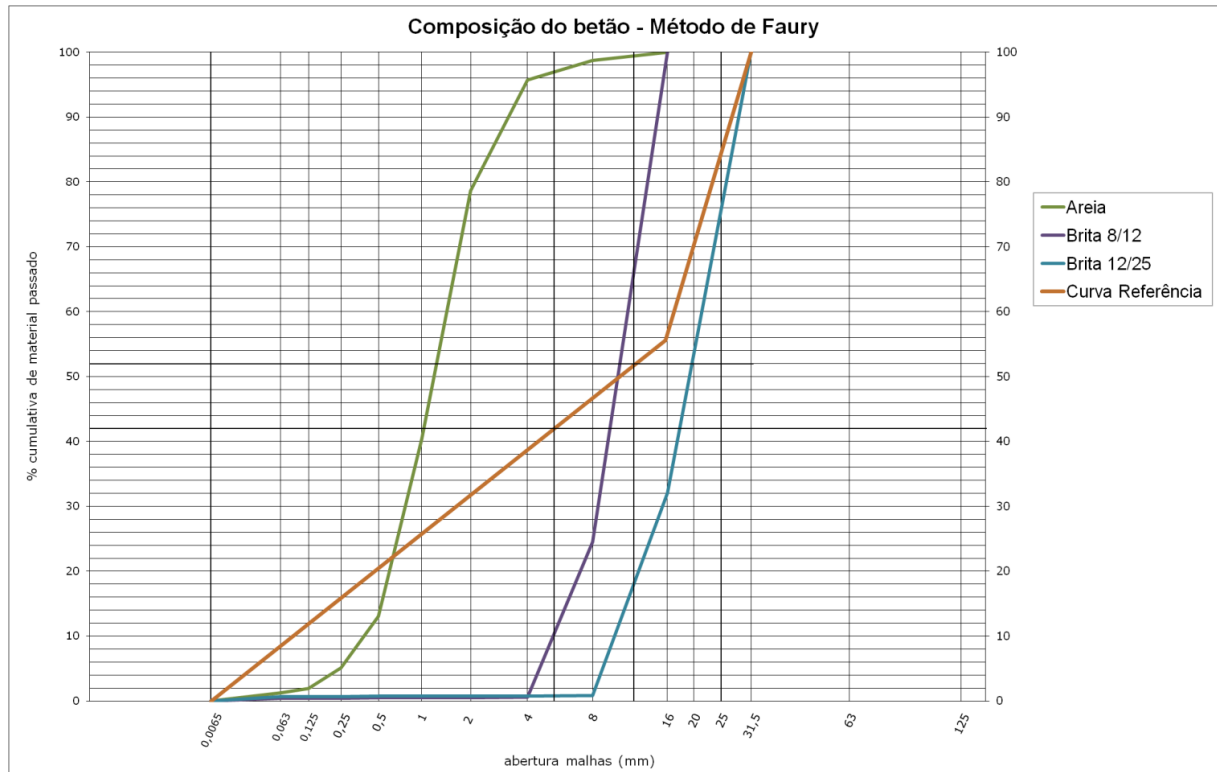


Gráfico 1 - Composição do betão - Método de Faury

Tabela 5 – Composição do betão

Material	% usada
Brita 12/25	38,00
Brita 8/12	20,00
Areia	28,33
Cimento	13,67

4.2.2. Preparação do betão

Calculadas todas as percentagens dos materiais passou-se à preparação do betão segundo a NP EN 206-1 (2007). Para isso, garantiu-se que todos os materiais necessários estavam disponíveis e bem limpos e determinou-se a quantidade total de betão a realizar. Com isto efetuaram-se os cálculos das quantidades de cada material a usar baseando-se nas

percentagens obtidas pelo método de Faury. Foram pesados individualmente todos os agregados, cimento e metacaulino necessários e medida a quantidade de água e superplastificante em recipientes próprios. Concluídas as medições e pesagens, colocaram-se primeiramente os agregados na betoneira, seguidos dos ligantes. Após a mistura ter uma aparência uniforme foi adicionada a água de amassadura juntamente com o superplastificante de modo a este ficar disperso. O processo de amassadura foi mantido por 5 minutos garantindo assim uma boa mistura e um aspecto uniforme.

Preparado o betão, realizou-se o ensaio de abaixamento (slump test) segundo a EN 12350-2 (2009). Com uma amostra representativa da amassadura, encheu-se 1/3 da altura do cone de Abrams e compactou-se este com 25 pancadas usando um varão de compactação. Repetiu-se este processo para as duas seguintes camadas de 1/3 de altura e regularizou-se a superfície. Posteriormente levantou-se o molde sem movimentos laterais ou torsionais e imediatamente se mediu e registou a diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto do provete que abaixou.

Confirmado que o valor do ensaio de abaixamento se encontra entre os valores pretendidos, passou-se ao enchimento dos provetes cúbicos, que previamente foram cobertos com óleo descofrante. Foram preenchidos os moldes até meia altura e seguidamente vibrados com uma agulha vibratória. Completou-se o enchimento, vibrou-se novamente, nivelou-se a superfície e identificou-se o provete. Passadas 48 horas de cura no molde à temperatura ambiente, os provetes foram descofrados e colocados para cura numa câmara à temperatura de 20°C e humidade relativa de 95%.

4.3. Métodos de ensaio

4.3.1. Baridade dos materiais

A determinação da baridade dos materiais foi executada segundo a norma NP EN 1097-3:2002. Foi colocada uma amostra de cada um dos materiais em estufa, a cerca de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ de forma a que fosse eliminada qualquer presença de água nesta. Para garantir essa mesma eliminação, a massa dessa amostra foi pesada consecutivamente com

intervalos de 1 hora até que esta atingisse uma massa constante, ou seja, a diferença entre pesagens não poderia ser maior do que 0,1%.

Para a brita 8/12 e para a brita 12/25 foram utilizados recipientes cilíndricos estanques em metal inoxidável, com capacidade de 5 litros, enquanto que para a areia, cimento e metacaulino foram usados recipientes idênticos com capacidade de 1 litro. Esta diferença deve-se à máxima dimensão de agregado, que segundo a norma aplicada neste ensaio, para agregados com dimensão máxima de 4 mm, a capacidade mínima do recipiente deverá ser 1 litro, enquanto que para um agregado com dimensão máxima de 16 mm, o recipiente nunca deverá ter menos de 5 litros.

Cada recipiente foi pesado vazio, seco e limpo (m_1). Posteriormente este foi cheio com o material com ajuda de uma pá a uma altura constante nunca inferior a 50 mm do bordo do recipiente até este transbordar. De seguida, o excedente foi removido, a superfície foi nivelada com recurso a uma régua sem nunca compactar o material e foi pesado o recipiente cheio (m_2). Este procedimento foi repetido três vezes para cada material.

A baridade, ρ_b , de cada material está registada na Tabela 6, e foi calculada segundo a seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Sendo,

m_1 – massa do recipiente vazio (g)

m_2 – massa do recipiente cheio com material (g)

V – capacidade do recipiente (cm³)

Tabela 6 - Baridade dos materiais

Material	Baridade (g/cm3)			
	$\rho_b 1$	$\rho_b 2$	$\rho_b 3$	ρ_b (média)
Brita 8/12	2,724	2,716	2,732	2,724
Brita 12/25	2,724	2,698	2,600	2,674
Areia	1,492	1,516	1,511	1,506
Cimento	1,199	1,198	1,212	1,203
Metacaulino 1000	0,560	0,555	0,555	0,557

4.3.2. Massa volúmica real dos materiais

A massa volúmica real dos materiais foi determinada conforme a norma NP EN 1097-6 (2003). Foram utilizados diferentes métodos para esta determinação consoante a dimensão do material, tal como referido na norma indicada. Para a brita 12/25, brita 8/12 e para a areia foi usado o método do picnómetro para partículas de agregado de dimensão entre 4 mm e 31,5 mm, enquanto que para o metacaulino (MTK1000) foi usado o método do picnómetro para partículas de agregado de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm. No caso do cimento foram usados os valores fornecidos pelo fabricante.

No método usado para as britas e para a areia foram inicialmente preparados os materiais lavando-os sobre o peneiro de 31,5 mm e sobre o peneiro de 4 mm de forma a retirar a partículas mais finas e rejeitar todas as superiores a 31,5 mm de dimensão. Posteriormente o agregado foi mergulhado no picnómetro com água a uma temperatura de 22°C e recorrendo a um agitador de vácuo foi retirado todo o ar ocluído no picnómetro. Colocou-se o picnómetro em banho maria durante 24h e retirou-se novamente o ar ocluído. Adicionou-se água neste até transbordar sem deixar entrar ar, secou-se e pesou-se (M_2). De seguida, o agregado foi retirado e deixado a escorrer. Encheu-se novamente o picnómetro apenas com água e registou-se a sua pesagem (M_3). O agregado foi transferido para um pano seco e foi limpa a sua superfície de modo a secar esta. Espalhou-se todo o agregado e foi deixado ao ar até desaparecerem as partículas visíveis de água, mas sem nunca deixar de ter um aspeto húmido. De seguida foi colocado num tabuleiro, pesado (M_1) e posto numa estufa ventilada a 110°C até atingir massa constante (M_4).

No caso do MTK1000 usou-se o método do picnómetro para partículas de agregado de dimensão entre 0,063 mm e 4 mm. Este método é muito semelhante ao usado para as britas e areia, mas apresenta diferenças consideráveis.

Iniciou-se preparando o material lavando-o sobre o peneiro de 4 mm e rejeitando as partículas retidas. Fez-se o mesmo sobre o peneiro de 0,063 mm de modo a remover as partículas mais finas. De seguida, imergiu-se o MTK1000 no picnómetro com água, retirou-se o ar ocluído no agitador de vácuo e colocou-se em banho maria por 24h a uma temperatura de 22°C. Após a imersão, voltou-se a colocá-lo no agitador de vácuo, acrescentou-se água até transbordar e colocou-se a tampa no picnómetro sem deixar entrar ar. Secou-se o picnómetro por fora e pesou-se (M_2). Posteriormente foi decantada a maior

parte da água do picnómetro e esvaziado num tabuleiro. Foi novamente cheio com água, colocada a tampa, seco exteriormente e pesado (M_3). O MTK1000, ainda molhado, foi espalhado no tabuleiro e deixado ao ar até a sua superfície estar seca e as suas partículas não aderirem umas às outras. Pesou-se o material (M_1) e colocou-se na estufa a 110°C até este atingir uma massa constante (M_4).

As massas volúmicas de cada material estão apresentadas na Tabela 7 e foram calculadas recorrendo às seguintes expressões:

- Massa volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m^3)

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$$

- Massa volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m^3)

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$$

- Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (Mg/m^3)

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$$

onde:

M_1 é a massa do agregado saturado com superfície seca ao ar (g)

M_2 é a massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado (g)

M_3 é a massa do picnómetro apenas cheio de água (g)

M_1 é a massa no ar do provete seco em estufa (g)

ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura registada na altura da determinação de M_2 (Mg/m^3).

Tabela 7 - Massa volúmica

Material	Massa Volúmica (Mg/m ³)		
	ρ_{ssd}	ρ_{rd}	ρ_a
Brita 12/25	2,64	2,59	2,72
Brita 8/12	2,57	2,52	2,65
Areia	2,13	2,05	2,23
Metacaulino 1000	2,31	2,19	2,49

4.3.3. Ensaio ultra sónico – Pundit

O aparelho para ensaios ultra sónico, Pundi 6 da marca CNSFarnell, apresentado na Figura 9, permite determinar a velocidade de uma vibração ultra sónica através de sólidos elásticos, medindo o tempo de transmissão que uma vibração leva a percorrer determinada distância.



Figura 9 - Pundit

A velocidade que impulsos ultra sónicos levam a percorrer um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas desse material. A qualidade de alguns materiais está por vezes relacionada com a sua dureza elástica pelo que a medida da velocidade de impulsos ultra sónicos em tais materiais pode ser usada para indicar a sua qualidade, assim como para determinar as suas propriedades elásticas (CNS Farnell 2003).

Este ensaio foi realizado em provetes cúbicos de 10 cm de largura em todas as composições deste trabalho, 0% MTK, 10% MTK1000, 20%MTK1000, 10% MKP e 20% MKP. Foram ensaiados três provetes de cada tipo para 28 dias, 90 dias e 180 dias de cura.

De modo a calibrar o aparelho, foi feito um teste inicial na barra de calibração. Para isso foi necessário colocar um pouco de massa consistente nos dois transdutores e seguidamente encostar firmemente cada um a uma extremidade da barra como mostra a Figura 10. Registou-se o valor obtido e com o controlo de calibração do aparelho ajustou-se esse valor ao indicado na barra de calibração, 26 μ s.



Figura 10 - Calibração Pundit

Calibrado o aparelho, limpam-se bem os transdutores e seguiu-se para as medições dos provetes. Foi colocada novamente massa consistente em cada transdutor e garantindo que a superfície dos cubos a ensaiar estava limpa e sem irregularidades, encostou-se firmemente cada transdutor em lados opostos do cubo e registou-se o valor obtido tal como apresenta a Figura 11. Este procedimento foi repetido para os três eixos do cubo, considerando-se a média desses como o valor final a registar.

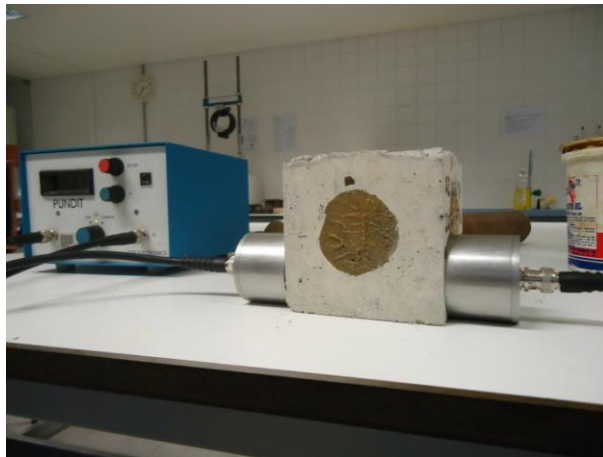


Figura 11 - Ensaio Pundit

4.3.4. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com recurso a uma máquina de ensaio da marca Form Test, modelo DigiMess M-10, como apresenta a Figura 12, em cubos de 10 cm de aresta, de acordo com a EN 12390-3 (2009).



Figura 12 - Máquina ensaio compressão

Neste ensaio foram usados três provetes cúbicos de cada tipo de betão, 0% MTK, 10% MTK1000, 20% MTK1000, 10% MKP e 20% MKP para idades de 28 dias, 90 dias e 180 dias de cura.

A máquina de ensaios foi previamente limpa entre cada ensaio, assim como todos os provetes. Foi ainda verificada a inexistência de danos ou buracos em cada um.

Posteriormente, os parâmetros da máquina foram ajustados ao ensaio e aos provetes. O cubo foi colocado na máquina, de forma a que a carga seja aplicada perpendicularmente à direção de moldagem e centrado relativamente ao prato inferior. Iniciou-se a aplicação da carga mantendo a velocidade desta a 0,6 MPa/s até o cubo entrar em rotura, altura em que a carga máxima é estabelecida e registada no visor da máquina de ensaios, como exibe a Figura 13.



Figura 13 - Registo carga máxima de compressão

Para finalizar, foi necessário verificar se todas as roturas dos cubos eram satisfatórias, como determina a NP EN 12390-3 (2009) e como mostra a Figura 14.

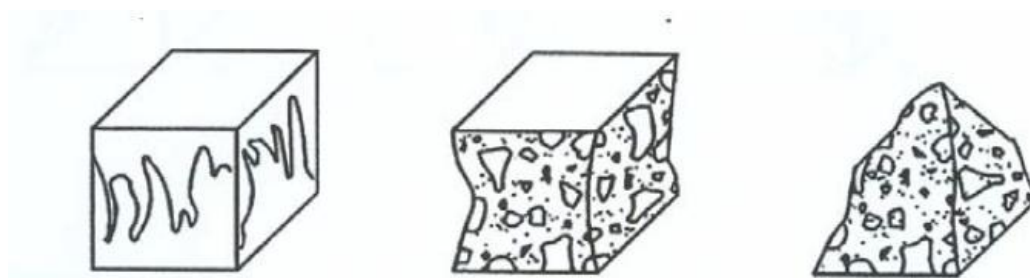


Figura 14 - Roturas satisfatórias (NP EN 12390-3: 2009)

Verificou-se então que todas estas eram satisfatórias, apresentando um aspecto muito semelhante ao apresentado na Figura 15.



Figura 15 - Rotura provete cúbico

4.3.5. Carbonatação do betão

De forma a determinar a carbonatação do betão, foi realizado um ensaio visual com fenolftaleína. Este consistiu na aplicação desta diretamente no provete de betão após o ensaio de compressão. O cubo, após rotura, foi regado com fenolftaleína no seu interior, verificando-se se este adquiria uma cor rosa no ponto de aplicação da fenolftaleína. Verificou-se que todos eles ficaram com cor rosa, concluindo-se que não existiu carbonatação do betão, tal como mostra a Figura 16.



Figura 16 - Cubo com fenolftaleína

4.3.6. Ensaio de penetração de cloretos no betão

Para o ensaio de penetração de cloretos foi necessário fabricar 3 cubos com 10 cm de aresta de cada mistura testada neste trabalho, nomeadamente com 0% MTK, 10% MTK1000, 20% MTK1000, 10% MKP e 20% MKP. Todos eles foram realizados de acordo com o procedimento anteriormente explicado. Após 28 dias de cura na câmara com 95% de humidade relativa, estes foram mergulhados em água do mar sintética durante um mês.

De acordo com o procedimento deste ensaio e em ordem a determinar o nível de penetração dos cloretos presentes na água do mar sintética, os cubos foram divididos a meio e uma das metades foi fatiada em três partes, exterior, meio e interior, tal como demonstra a Figura 17.

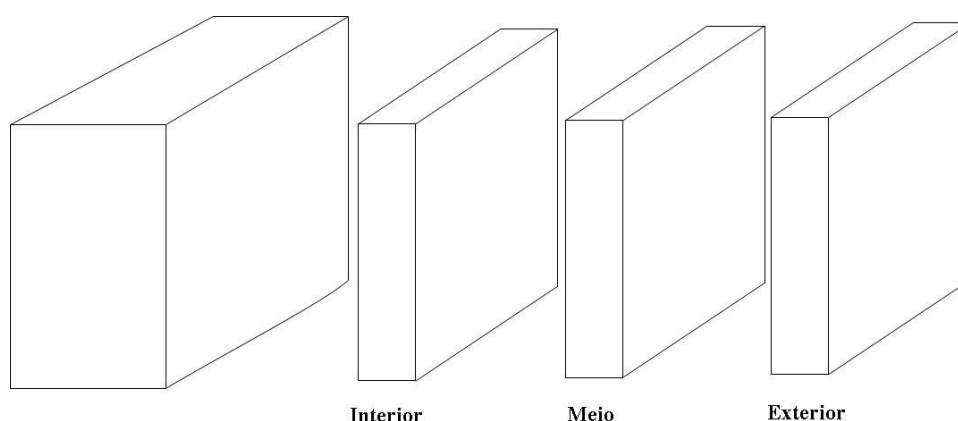


Figura 17 - Cubos fatiados

Essas fatias foram posteriormente moídas com recurso a um moínho de aço e foi analisada a quantidade de cloretos presentes em cada uma, usando o ensaio de quantificação de cloretos por potenciometria.

4.3.6.1. Água do mar sintética

A água do mar sintética foi criada em laboratório de acordo com Bai et al. (2003) e tem por base a composição ilustrada na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição água do mar sintética

Elemento	Quantidade (g/l)
NaCl	30,0
MgCl₂	6,0
MgSO₄	5,0
CaSO₄.2H₂O	1,5
KHCO₃	0,2

Os cubos necessários à realização do ensaio foram previamente impermeabilizados em 4 das 6 faces de cada um, restringindo assim a penetração da água em apenas 2 faces laterais.

Foram cheios baldes de 50 litros com água do mar sintética, onde foram mergulhados os cubos que aí permaneceram por um mês. Após serem daí retirados, colocaram-se os mesmos numa estufa a 65°C durante 2 semanas até estarem completamente secos e prontos a serem moídos.

4.3.6.2. Moagem

O processo de moagem foi realizado recorrendo a um moínho de anéis de aço. Para esse efeito foi necessário partir cada uma das fatias do cubo em pequenos pedaços fazendo uso de um martelo e um almofariz, para que a amostra pudesse ajustar-se ao moínho, Figura 18.



Figura 18 - Almofariz

Após ter todo o equipamento bem limpo com álcool etílico e as amostras devidamente identificadas, estas foram colocadas no moínho de anéis de aço, garantindo um peso nunca superior a 100g de modo a obtermos uma boa moagem, Figura 19.



Figura 19 - Moínho de anéis de aço

Cada amostra foi moída por 5 minutos, verificando-se no fim se esta passava no peneiro de 0,150mm, Figura 20. Caso toda a amostra não atravessasse esse peneiro, a moagem seria repetida por mais 5 minutos. Concluído este processo a amostra foi guardada e novamente identificada numa embalagem plástica.



Figura 20 - Peneiro

4.3.6.3. Ensaio de quantificação de cloretos por potenciometria – Eléctrodo Iónico Seletivo

Neste procedimento foi necessária a preparação de ácido nítrico a 10% v/v. Para isso foram adicionados através de uma pipeta, 100 ml de HNO_3 e diluídos em água destilada num balão de 1 litro. A amostra foi pesada com cerca de 5 g para um copo de vidro, onde foi adicionado cuidadosamente 100 ml de ácido nítrico (10% v/v). Essa solução foi fervida durante 10 minutos e mantida em fervura por mais 15 minutos, Figura 22. Após fervura, a solução foi filtrada com água destilada através de papel de filtro médio para um balão volumétrico de 500 ml até completar o mesmo como mostra a Figura 21.

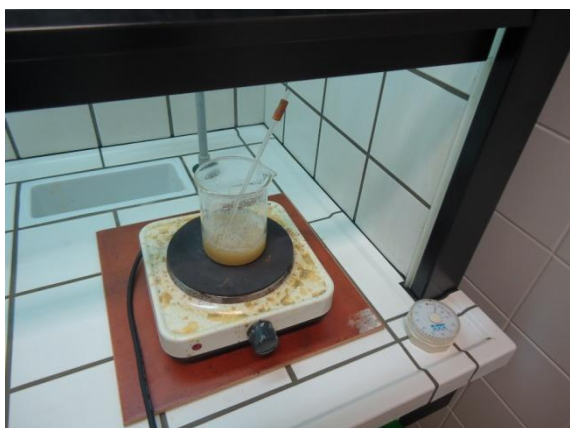


Figura 22 - Fervura



Figura 21 - Filtro

Foram preparadas soluções padrão de cloreto para efeitos de calibração do ensaio. Essas mesmas soluções implicaram a diluição de cloreto para concentrações de 5, 10, 50, 100, 500 e 1000 mg/l para um balão de 100 ml. De cada uma pipetaram-se 50 ml para um copo de 100 ml e a todas elas foram adicionados 2 ml de solução tampão ISA (Ionic Strength Adjustor), obtida através da dissolução de NaNO_3 em água destilada que permite aumentar a força iônica da solução necessária à realização do ensaio. Posteriormente realizou-se a calibração do eletrodo fazendo a leitura individual de cada padrão no analisador multi parâmetros e registrando o valor obtido em mV, Figura 23.

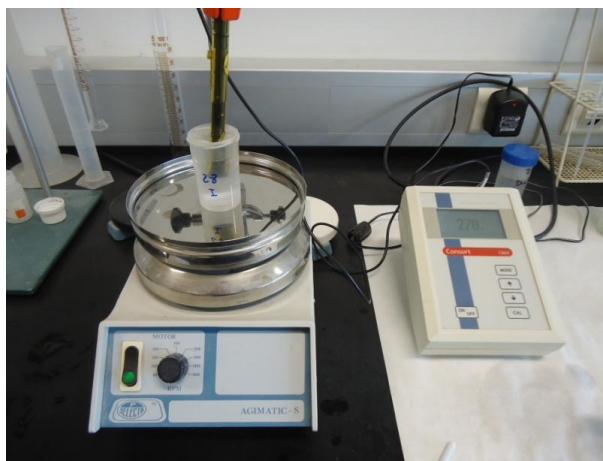


Figura 23 - Analisador multi parâmetros

Para cada solução de amostra foi concretizado o mesmo procedimento explicado anteriormente, registado o valor obtido e verificado se esse mesmo valor estava compreendido entre os valores padrão.

5. Caracterização dos materiais

5.1. Metacaulino

5.1.1. Metacaulino “Argical-M 1000” (MTK1000)

O MTK1000 é um alumino-silicato dextróide. É um material maioritariamente amorfo, não-cristalino e é constituído por partículas lamelares. Este material tem como sua fórmula geral $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Na Tabela 9 é mostrada a sua composição química e tal como a sua fórmula geral indica, os seus principais constituintes são a Sílica (SiO_2) e o Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Nesta composição química realça-se também o facto de a perda ao rubro ter sido efetuada por gravimetria após calcinação a 1000 °C durante 3 horas.

Tabela 9 - Composição química

Elemento	%
SiO₂	57,13
Al₂O₃	34,24
Fe₂O₃	1,15
MnO	0,01
MgO	0,23
CaO	0,10
K₂O	0,49
TiO₂	1,91
P₂O₅	0,04
Perda ao rubro	5,00

A Tabela 10 apresenta algumas das características físicas do MTK como o Chapelle, superfície específica, massa volúmica real e baridade.

Tabela 10 - Características físicas

Índice Pozolânico (Chapelle modificado)	1100 mg Ca(OH) ₂ /g
Superfície específica (BET)	17 m ² /g
Massa volúmica real	2,49 g/cm ³
Baridade	0,557 g/cm ³

A distribuição granulométrica disposta no Gráfico 2, foi determinada experimentalmente em laboratório pelo método de sedimentação e absorção de raio x (Sedigraph).

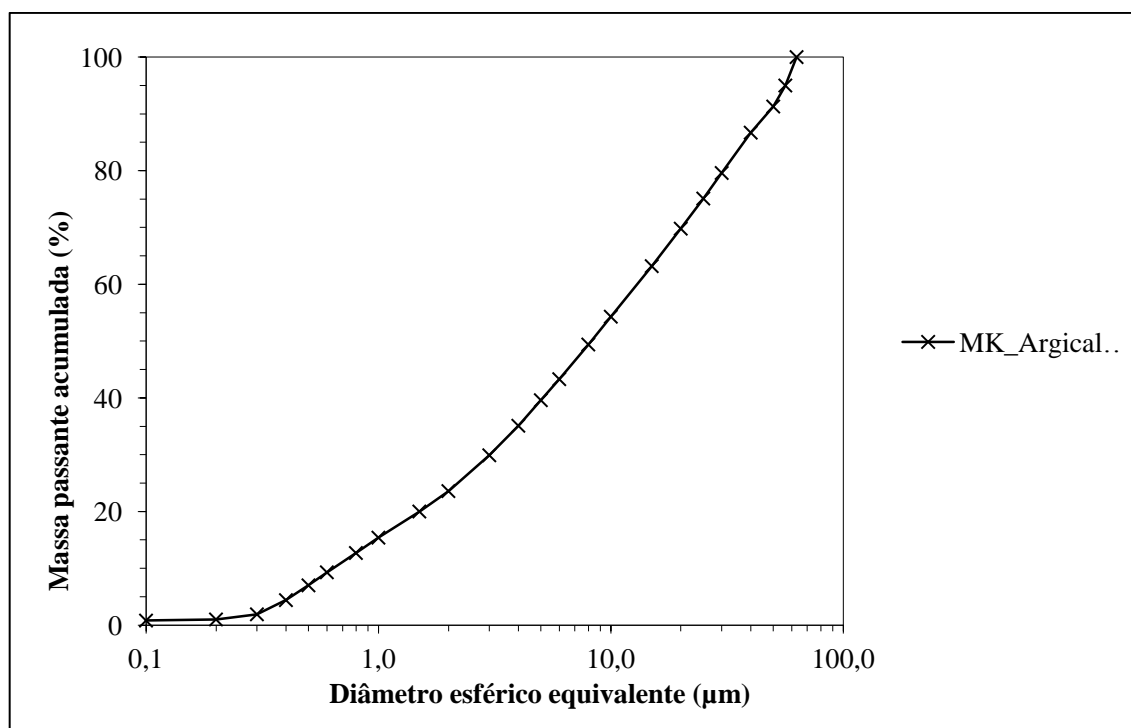


Gráfico 2 - Distribuição granulométrica MTK1000

O Gráfico 3 mostra a composição mineralógica do MTK1000. Esta foi obtida experimentalmente em laboratório por difração de Raios X (DRX) e expõe a presença de Quartzo, Ilite/Moscovite, Caulinite e Mulite.

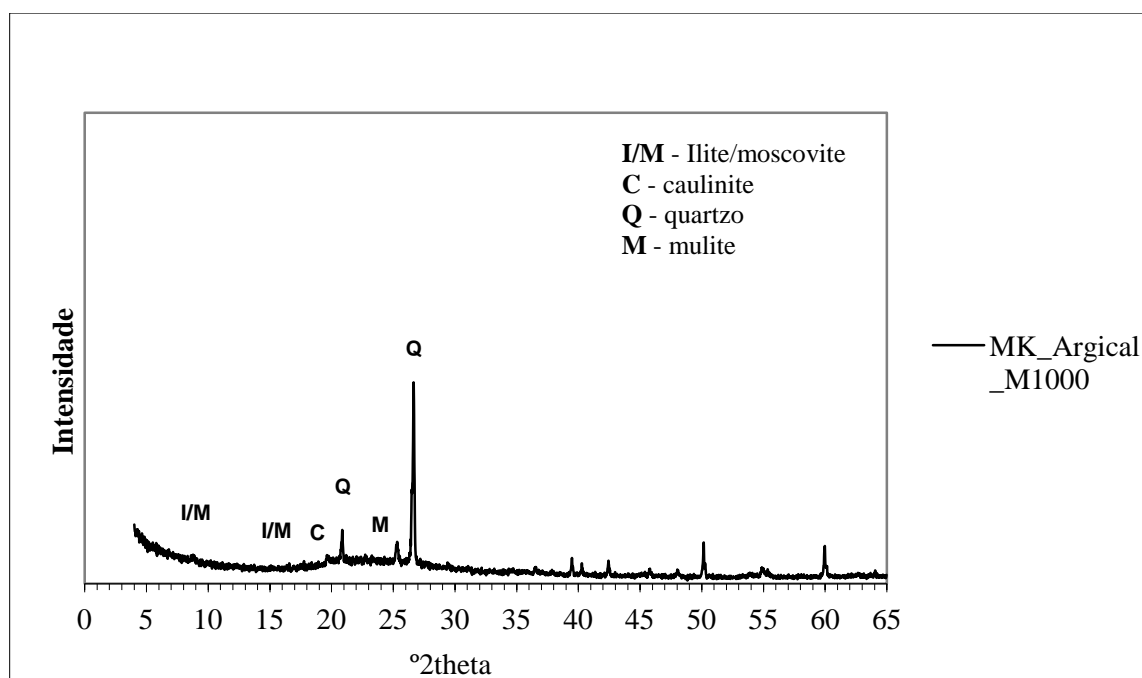


Gráfico 3 - Composição mineralógica MTK1000

5.1.2. Metacaulino português (MKP)

Este material foi sujeito a vários ensaios dos quais se obtiveram importantes informações para a realização dos trabalhos. A Tabela 11 mostra as suas características físicas, como o Chapelle, superfície específica e massa volúmica real. A composição química deste elemento apresentada na Tabela 12, foi obtida experimentalmente através de um Espectrofotómetro de raios-X e exibe uma predominância de Sílica (SiO_2) e Óxido de Alumínio (AlO_3). Neste caso, a perda ao rubro também foi alcançada por gravimetria após calcinação a 1000 °C durante 3 horas.

Tabela 11 - Características físicas

Índice Pozolânico (Chapelle modificado)	1235 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /g
Superfície específica (BET)	8,7 m ² /g
Massa volúmica real	2,8 g/cm ³

Tabela 12 - Composição química MKP

Elemento	%
SiO ₂	51,41
Al ₂ O ₃	34,67
Fe ₂ O ₃	0,72
MgO	0,09
CaO	0,03
Na ₂ O	3,12
K ₂ O	1,22
TiO ₂	0,23
P ₂ O ₅	7,70
Perda ao rubro	0,81

No Gráfico 4 é apresentada a curva de distribuição granulométrica do MKP. Esta foi determinada pelo método de sedimentação e absorção de Raios X em laboratório.

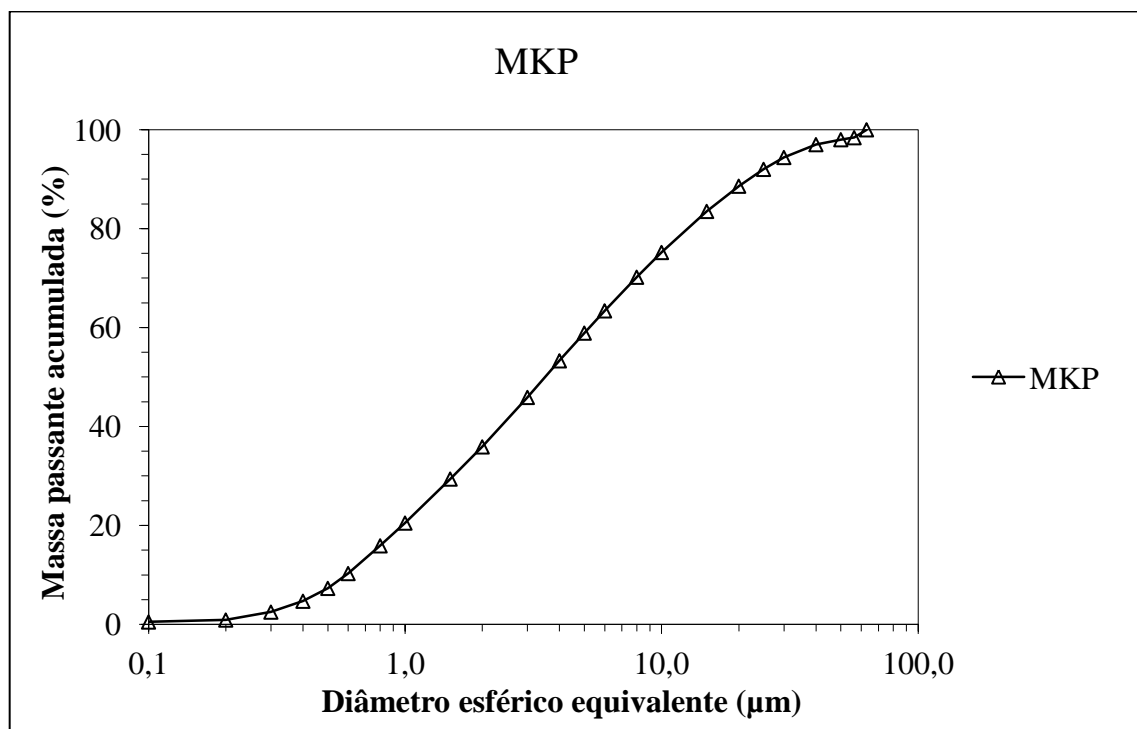


Gráfico 4 - Curva de distribuição granulométrica do MKP

A composição mineralógica do MKP realizada experimentalmente por difração de Raios X é disposta no Gráfico 5, salientando a presença de Quartzo, assim como de Ilite/Moscovite, Caulinite e Feldspato alcalino.

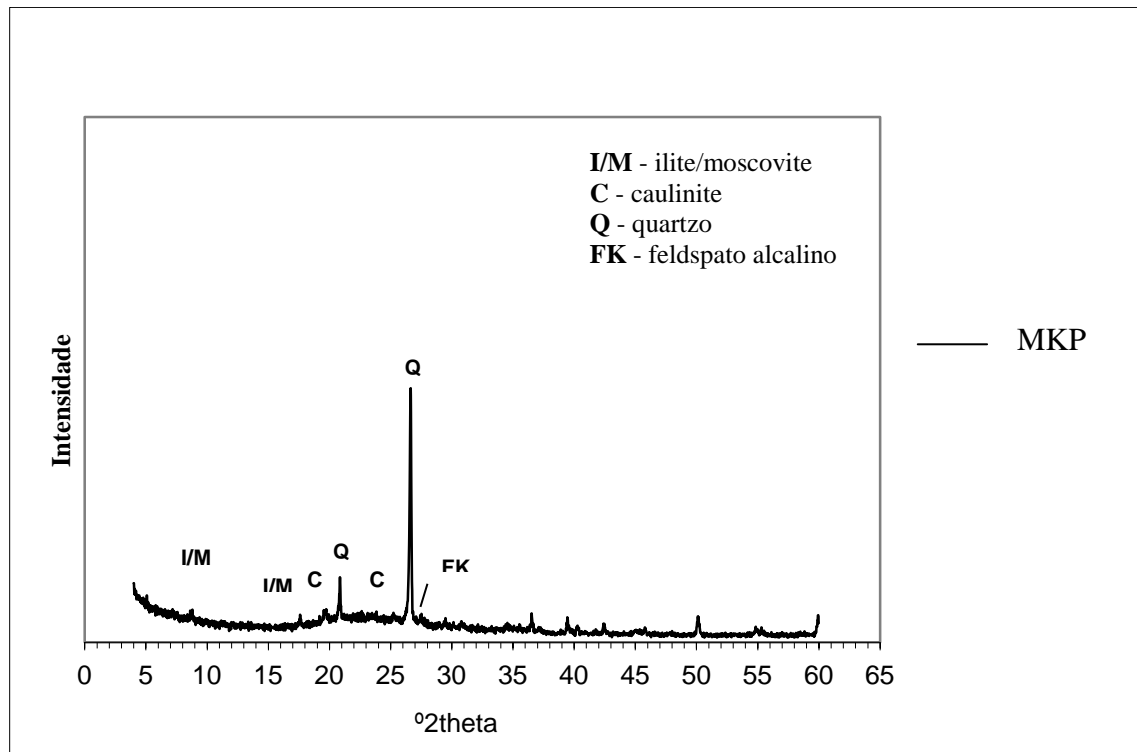


Gráfico 5 - Composição mineralógica MKP

5.2. Cimento

O cimento CEM I 42,5R da empresa CIMPOR é constituído por mais de 95% de clínquer, sendo a sua resistência à compressão a 28 dias de 42,5 MPa.

5.3. Agregados

5.3.1. Brita 12/25

A análise granulométrica desta brita, demonstrada na Tabela 13 e no Gráfico 6, foi realizada e fornecida pelo Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e foi realizada segundo a NP EN 933-1. Esta brita calcária é bastante grosseira como mostra a seguinte análise, verificando-se que a maioria do material fica retido nos peneiros 5/8 e 5/16. A Figura 24 mostra o aspeto macroscópico desta brita.

Tabela 13 - Peneiração a seco Brita 12/25

Mesh	Mm	Mat.retido (g)	% Material Retido	% Cumulativa de Material Retido	% Cumulativa de Material Passado
2 ½	63,0	0,0	0,0	0,0	100,0
1 ¼	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
5/8	16,0	1578,7	68,0	68,0	32,0
5/16	8,0	725,0	31,2	99,2	0,8
5	4,0	1,8	0,1	99,3	0,7
10	2,0	0,0	0,0	99,3	0,7
18	1,0	0,0	0,0	99,3	0,7
35	0,500	0,2	0,0	99,3	0,7
60	0,250	0,2	0,0	99,3	0,7
120	0,125	0,4	0,0	99,3	0,7
230	0,063	0,9	0,0	99,4	0,6
-	Fundo, P	0,4	0,0	-	-

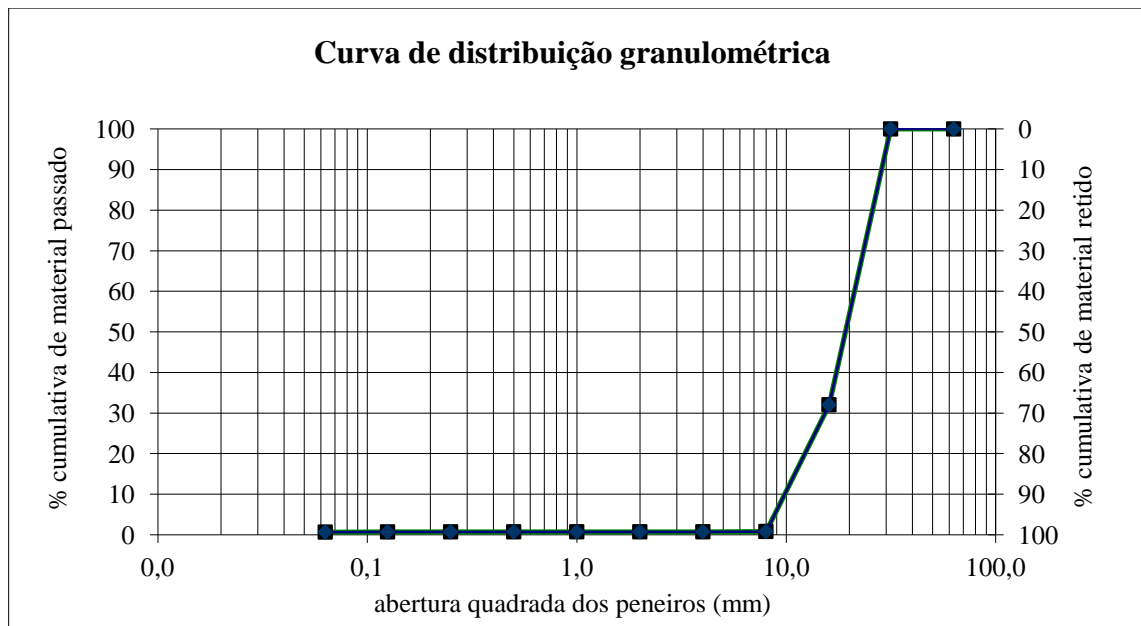


Gráfico 6 - Curva de distribuição granulométrica da Brita 12/25



Figura 24 - Brita 12/25

5.3.2. Brita 8/12

Esta brita calcária, tal como a anterior, foi analisada segundo a NP EN 933-1 (2000). Verifica-se neste caso, segundo a sua análise granulométrica registada na Tabela 14 e Gráfico 7 que esta é menos grosseira, observando-se na peneiração que a maior parte

do material fica retido nos peneiros 5/16 e 5, com aberturas de malha de 8 mm e 4 mm respectivamente. O seu aspeto macroscópico está registado na Figura 25.

Tabela 14 - Peneiração a seco Brita 8/12

Mesh	mm	Mat.retido (g)	% Material Retido	% Cumulativa de Material Retido	% Cumulativa de Material Passado
2 ½	63,0	0,0	0,0	0,0	100,0
1 ¼	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
5/8	16,0	0,0	0,0	0,0	100,0
5/16	8,0	846,5	75,5	75,5	24,5
5	4,0	267,5	23,9	99,4	0,6
10	2,0	1,3	0,1	99,5	0,5
18	1,0	0,2	0,0	99,5	0,5
35	0,500	0,2	0,0	99,5	0,5
60	0,250	0,1	0,0	99,5	0,5
120	0,125	0,1	0,0	99,6	0,4
230	0,063	0,1	0,0	99,6	0,4
-	Fundo, P	0,1	0,0	-	-

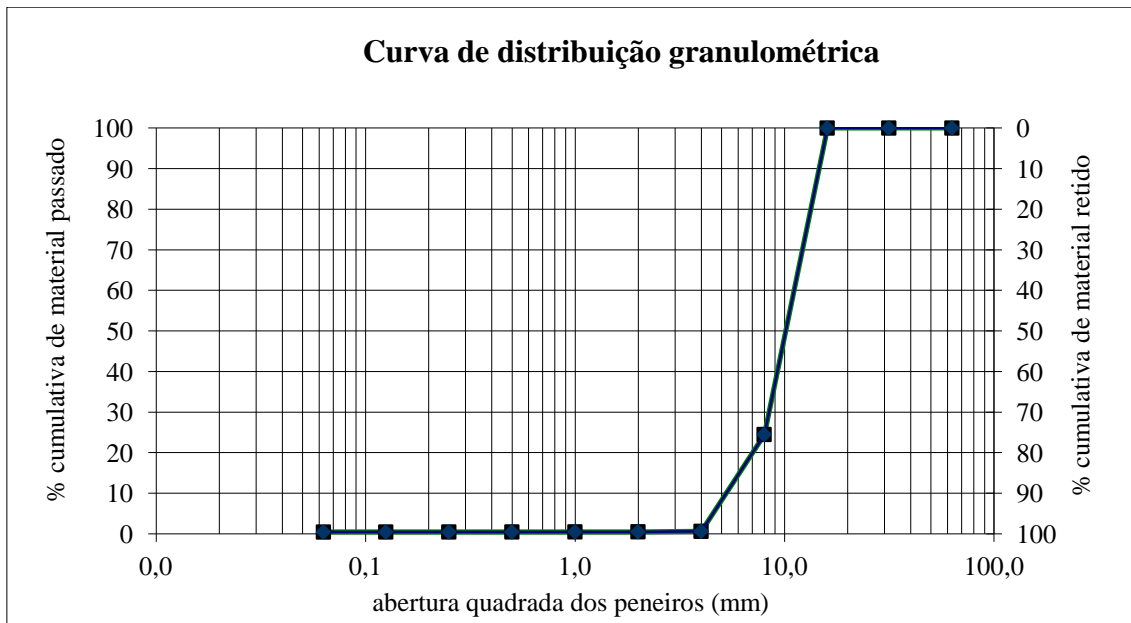


Gráfico 7 - Curva de distribuição granulométrica da Brita 8/12



Figura 25 - Brita 8/12

5.3.3. Areia

A areia fornecida pelo LabCIVIL, “Areia Salgueiro crivada”, apresenta tal como indicado na Tabela 15 e Gráfico 8, uma análise granulométrica variada, sendo o material retido maioritariamente pelos peneiros 10, 18 e 35. A Figura 26 apresenta uma imagem geral desta areia.

Tabela 15 - Peneiração a seco da areia

Mesh	mm	Mat.retido (g)	% Material Retido	% Cumulativa de Material Retido	% Cumulativa de Material Passado
2 ½	63,0	0,0	0,0	0,0	100,0
1 ¼	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
5/8	16,0	0,0	0,0	0,0	100,0
5/16	8,0	7,8	1,3	1,3	98,7
5	4,0	19,0	3,1	4,3	95,7
10	2,0	106,3	17,0	21,3	78,7
18	1,0	238,4	38,2	59,5	40,5
35	0,500	170,8	27,4	86,9	13,1
60	0,250	49,5	7,9	94,9	5,1
120	0,125	20,2	3,2	98,1	1,9
230	0,063	4,1	0,7	98,8	1,2
-	Fundo, P	0,1	0,0	-	-

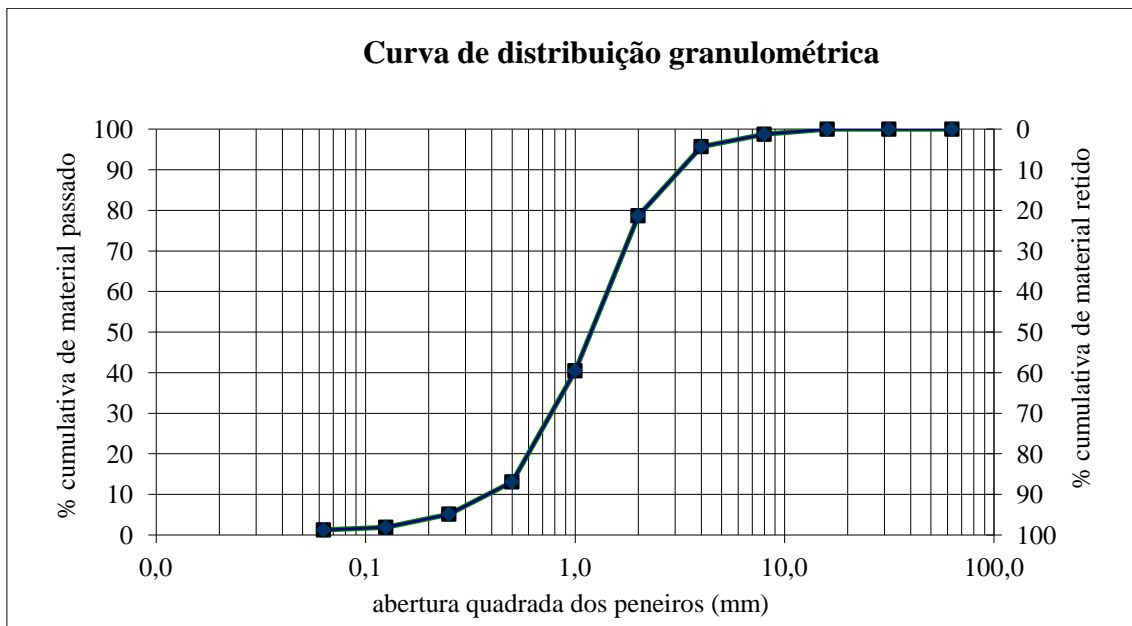


Gráfico 8 - Curva de distribuição granulométrica da areia



Figura 26 – Areia

5.4. Superplastificante

O Sika ViscoCrete 3008, segundo informação do fabricante, actua sobre as partículas do cimento permitindo uma elevada redução de água de amassadura e/ou um

aumento da trabalhabilidade. A Tabela 16 mostra os mais importantes dados técnicos deste produto (www.sika.pt).

Tabela 16 - Dados técnicos "Sika ViscoCrete 3008" (www.sika.pt)

Base química	Solução aquosa de policarboxilatos modificados
Massa volúmica (23 ± 2 °C)	$1,07 \pm 0,02$ kg/dm ³
pH (23 ± 2 °C)	$5,5 \pm 1,0$
Teor de sólidos	$26,5 \pm 1,3\%$
Teor em iões cloreto	$< 0,1\%$

6. Avaliação do comportamento do betão

6.1. Avaliação da resistência do betão à compressão

Esta avaliação é realmente importante para que se possa compreender o comportamento mecânico do betão após a incorporação de metacaulino. Os valores apresentados na Tabela 17 foram obtidos após ensaios de resistência à compressão a provetes cúbicos de 10 cm para as diferentes composições de betão. Para cada uma, foram ensaiados três cubos de cada idade, sendo os valores apresentados uma média aritmética desses três provetes.

Tabela 17 - Tensão de compressão

Betão	Tensão de compressão (N/mm ²)		
	28 dias	90 dias	180 dias
0% MTK	24,07	31,80	31,60
10% MTK 1000	37,55	40,30	38,87
20% MTK 1000	39,23	40,10	39,67
10% MKP	44,87	49,20	39,87
20% MKP	41,50	46,27	36,83

6.1.1. Comparação dos betões

Os vários betões foram ensaiados aos 28, 90 e 180 dias. Isto permite efetuar uma comparação efetiva da resistência à compressão desses mesmos para essas diferentes idades. Os gráficos apresentados mostram ainda o desvio padrão relativo aos três provetes ensaiados para cada composição, permitindo assim uma melhor análise destes.

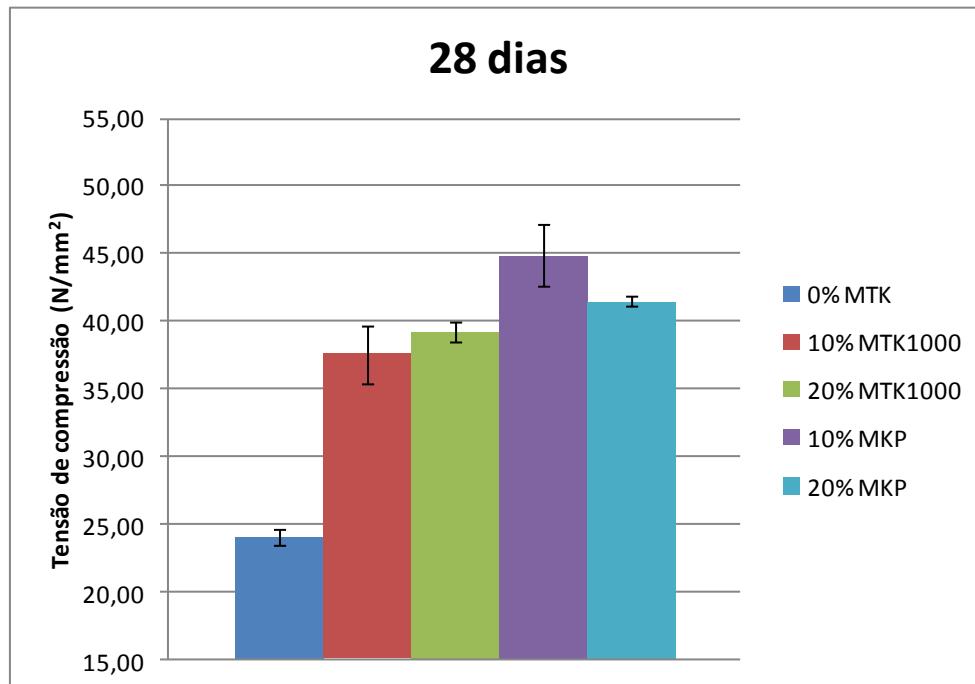


Gráfico 9 - Tensão de compressão a 28 dias

De acordo com o Gráfico 9, em que é realizado um estudo comparativo entre todas as misturas aos 28 dias de cura do betão, este revela melhorias significativas na sua resistência após a adição de metacaulino. No caso particular de 10%MKP o aumento de resistência é de 83%. Estes ensaios mostram também que o betão com metacaulino português (MKP) apresenta um ligeiro aumento da sua resistência à compressão em relação ao betão com metacaulino francês (MTK1000). Verifica-se, no entanto, que a adição de 20% de MKP não provoca resultados tão positivos como a adição de 10% deste material.

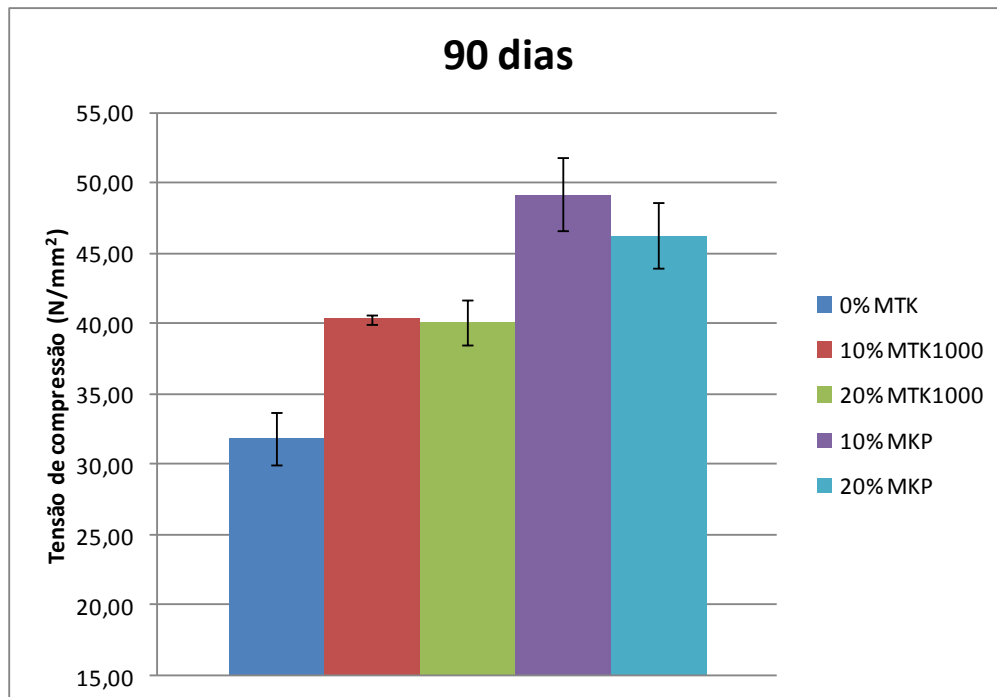


Gráfico 10 - Tensão de compressão a 90 dias

Tal como no gráfico anterior, este Gráfico 10 mostra um aumento da resistência após a adição de metacaulino, revelando também um maior aumento com a adição do MKP. De salientar que o aumento da resistência para 10%MTK1000 é de 27%, enquanto que para 10%MKP é de 55%.

A análise destes resultados permite afirmar que o metacaulino português influi de forma mais evidente a resistência à compressão nas primeiras idades (28 e 90 dias).

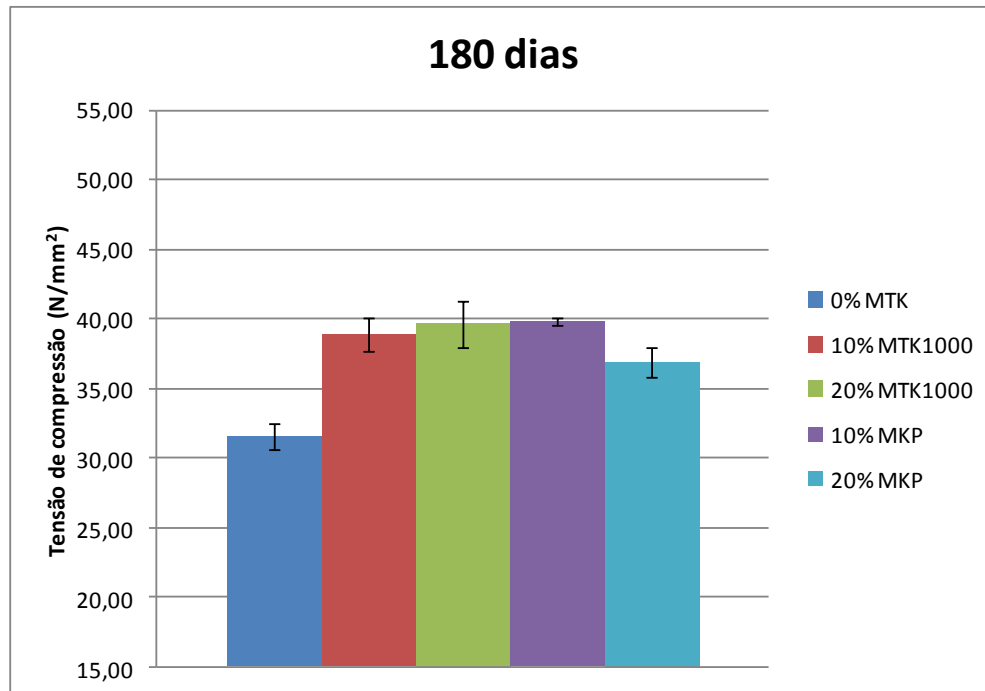


Gráfico 11 - Tensão de compressão a 180 dias

Apesar do notório acréscimo da resistência com a implementação do metacaulino, cerca de 20%, ao contrário dos gráficos anteriores, o Gráfico 11 exibe uma equivalência de resultados entre o MTK1000 e o MKP, demonstrando que, a longo prazo, o efeito da adição destes materiais é semelhante. Em termos de MKP, a adição de 10% é claramente mais favorável face a 20%.

6.1.2. Evolução ao longo do tempo

Esta análise permite observar a evolução da resistência à compressão de cada tipo de betão individualmente. Pode-se aqui verificar as tensões de compressão necessárias à rotura para idades de 28, 90 e 180 dias.

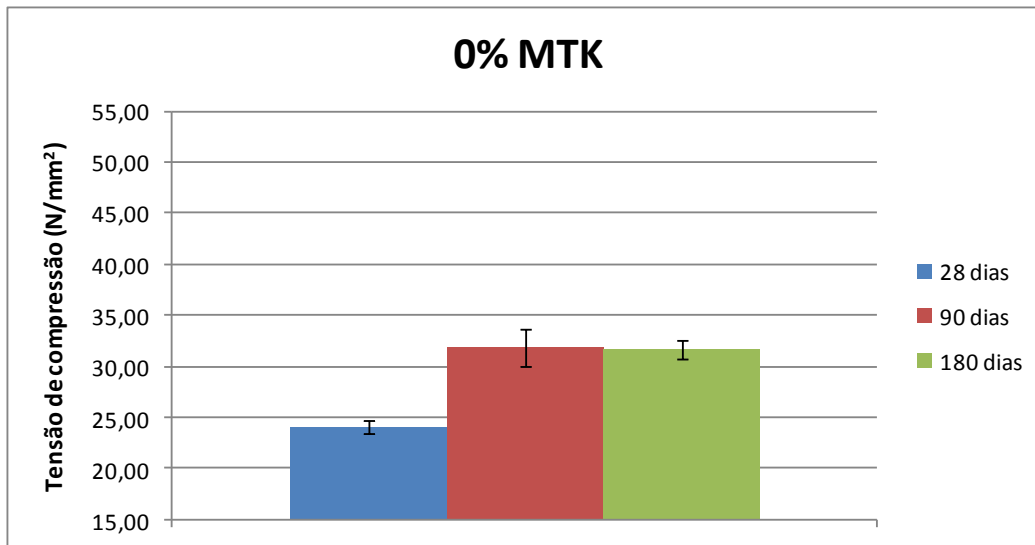


Gráfico 12 - Resistência à compressão com 0% MTK

Para este betão com 0% MTK, ou seja, um betão normal, sem metacaulino, o Gráfico 12 mostra uma evolução natural e esperada da resistência deste. Há um aumento significativo da resistência dos 28 dias para os 90 dias, sendo que após esta idade, este valor tem tendência a estabilizar.

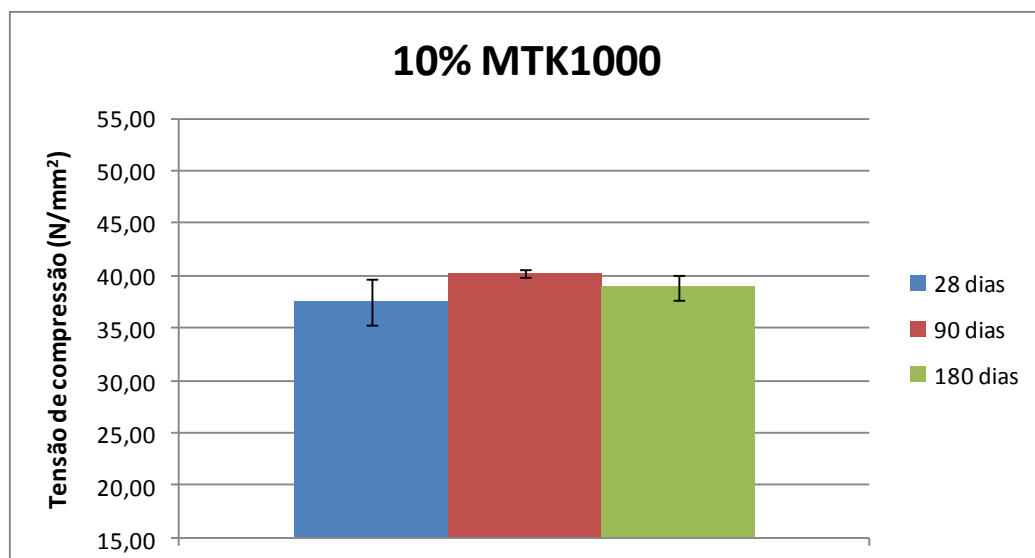


Gráfico 13 - Resistência à compressão com 10% MTK1000

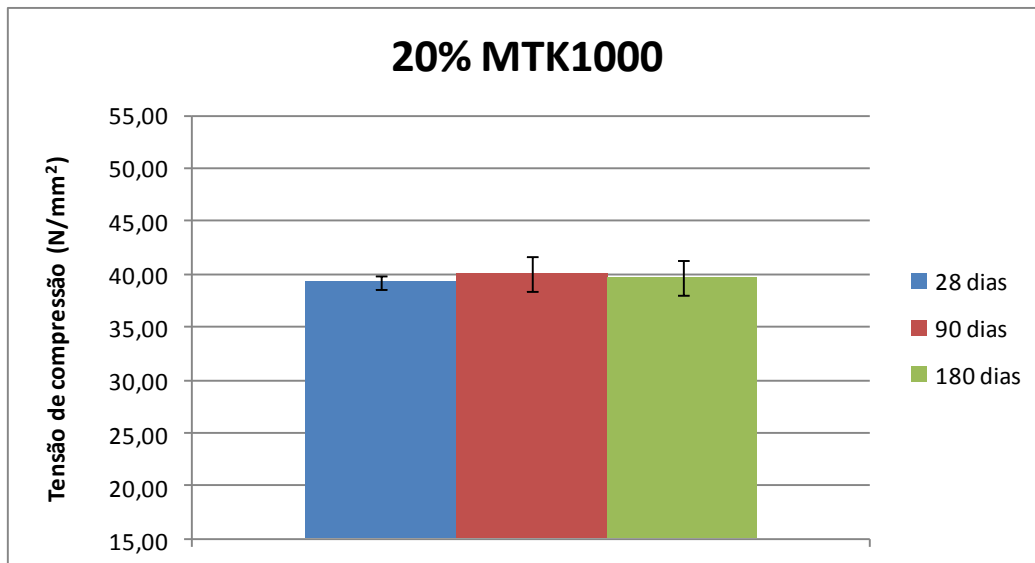


Gráfico 14 - Resistência à compressão com 20% MTK1000

No Gráfico 13 e Gráfico 14, para betões com 10% MTK1000 e 20% MTK1000 respectivamente, é mostrado que a variação da resistência à compressão não varia muito para as diferentes idades, notando-se apenas um ligeiro aumento desta após os 28 dias. Pode-se então concluir que a adição deste metacaulino gera uma maior rapidez no ganho da sua resistência mecânica comparativamente ao betão sem metacaulino.

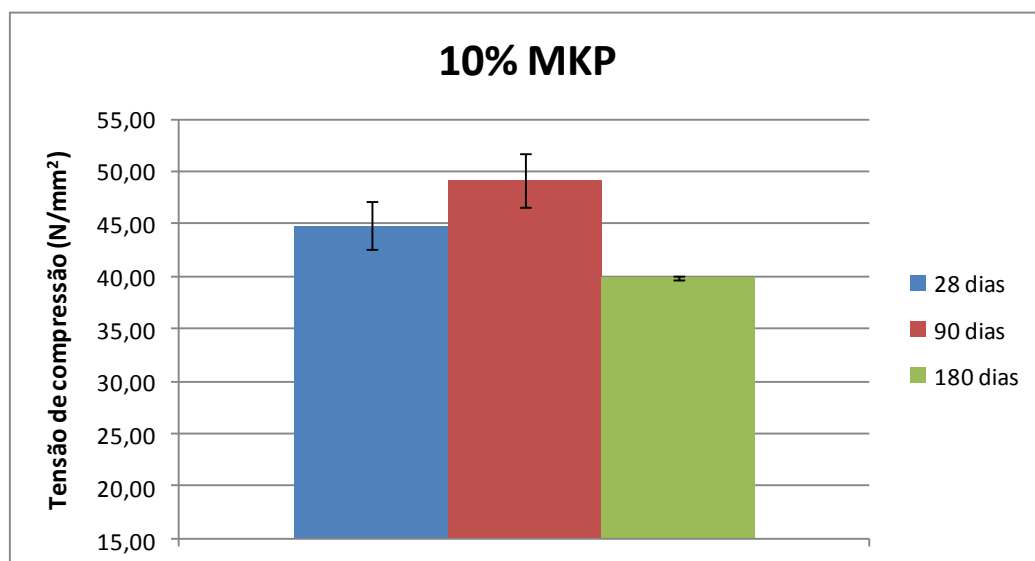


Gráfico 15 - Resistência à compressão com 10% MKP

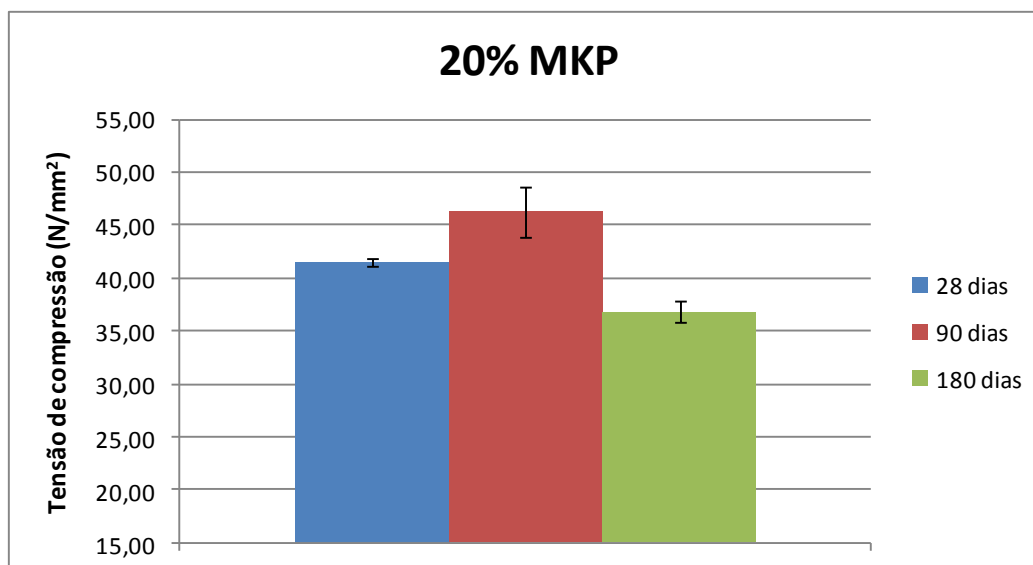


Gráfico 16 - Resistência à compressão com 20% MKP

Para betões com 10% MKP e 20% MKP, os Gráficos 15 e 16 exibem um comportamento do betão ligeiramente diferente. Verifica-se um aumento da resistência após os 28 dias, sendo que depois dos 90 dias, esse mesmo valor desce cerca de 20%. Esta descida pode estar ligada à formação de compostos metaestáveis, cujo desaparecimento gera diminuição da resistência mecânica do betão (Gameiro et al, 2012).

6.2. Estimativa do módulo de elasticidade estático e dinâmico

De acordo com o manual de utilização do aparelho PUNDIT 6, é possível fazer uma estimativa para os valores do módulo de elasticidade estático e dinâmico.

A Figura 27 apresenta um ábaco onde estão dispostas duas curvas que permitem relacionar diretamente a velocidade de transmissão de impulsos ultra sónicos com o módulo de elasticidade. Com o PUNDIT 6 foram obtidos os valores do tempo de transmissão de um impulso pelo provete de betão, apresentados agora na Tabela 18. Como a distância entre os dois pontos de receção/transmissão é conhecida, igual à distância da

aresta do provete, facilmente se consegue a velocidade de transmissão pela razão de $\text{Velocidade} = \text{Distância} / \text{Tempo}$. Após a obtenção desta velocidade de impulso, consultando o ábaco disposto na Figura 27, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade estático, assim como o módulo de elasticidade dinâmico.

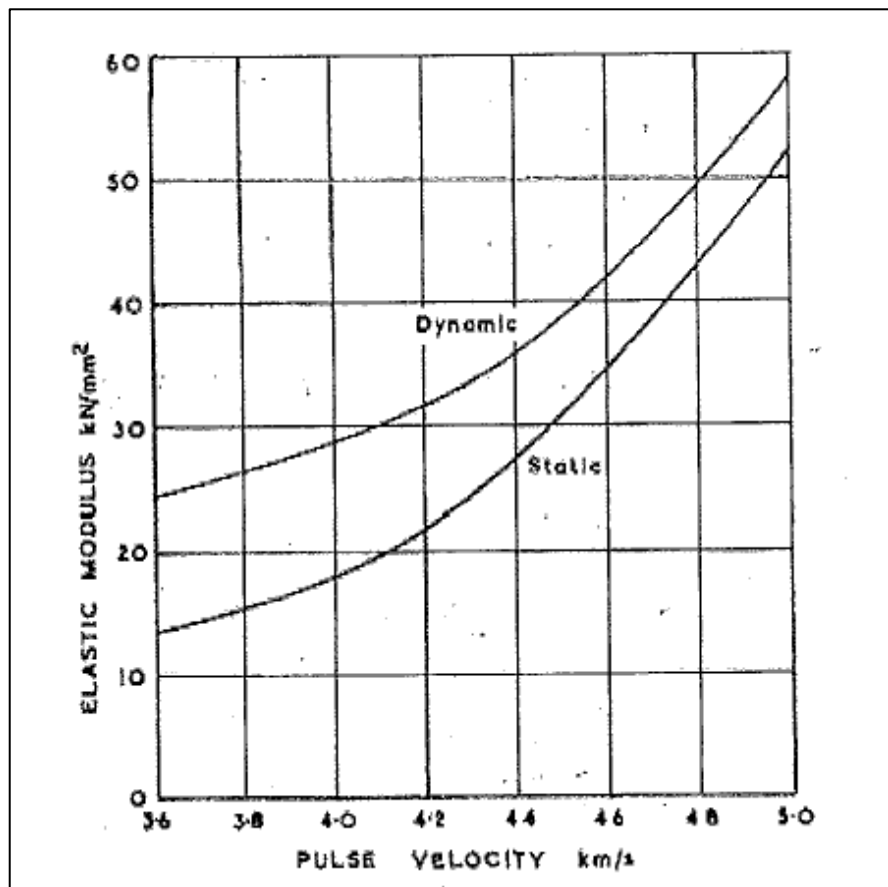


Figura 27 – Ábaco módulo de elasticidade

Tabela 18 - Módulo elasticidade

Tempo de cura	Betão	Aresta (m)	Pundit (μs)	Velocidade transmissão (km/s)	Módulo Elasticidade Estático (kN/mm ²)	Módulo Elasticidade Dinâmico (kN/mm ²)
28 dias	0% MTK	0,1	21,03	4,76	41	48
	10% MTK1000	0,1	20,87	4,79	43	49
	20% MTK1000	0,1	20,87	4,79	43	49
	10% MKP	0,1	20,70	4,83	45	50
	20% MKP	0,1	20,60	4,85	45	50
90 dias	0% MTK	0,1	20,30	4,93	49	56
	10% MTK1000	0,1	20,40	4,90	48	55
	20% MTK1000	0,1	20,13	4,97	51	57
	10% MKP	0,1	19,87	5,03	53	59
	20% MKP	0,1	20,10	4,98	51	57
180 dias	0% MTK	0,1	20,00	5,00	52	58
	10% MTK1000	0,1	20,10	4,98	51	57
	20% MTK1000	0,1	19,97	5,01	52	58
	10% MKP	0,1	20,03	4,99	52	58
	20% MKP	0,1	20,33	4,92	49	56

A Tabela 18 apresenta a estimativa do módulo de elasticidade estático e do módulo de elasticidade dinâmico. Embora seja apenas uma estimativa calculada manualmente pelo ábaco fornecido pelo fabricante, foi realizada uma análise de comparação de módulos de elasticidade entre diferentes tipos de betão para cada tempo de cura.

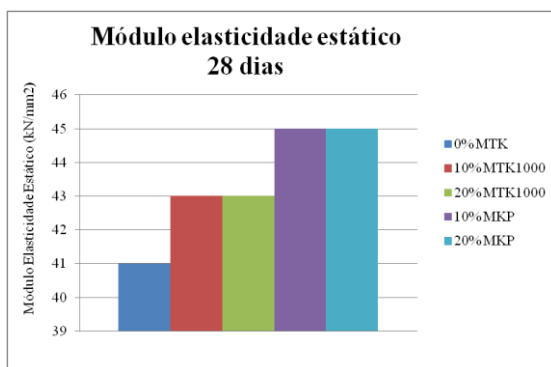


Gráfico 17 - Módulo elasticidade estático a 28 dias

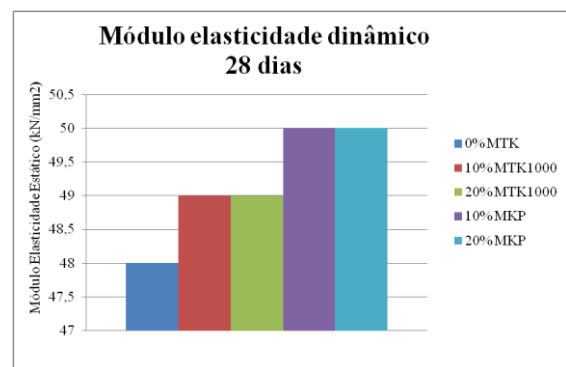


Gráfico 18 - Módulo elasticidade dinâmico a 28 dias

Do Gráfico 17 e do Gráfico 18 verifica-se um aumento notório dos dois módulos de elasticidade para os betões com adição de metacaulino comparativamente ao betão sem metacaulino, sendo o aumento das duas composições com MKP muito mais significativo.

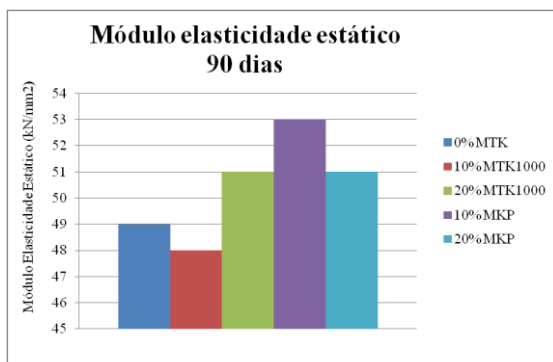


Gráfico 19 - Módulo elasticidade estático a 90 dias

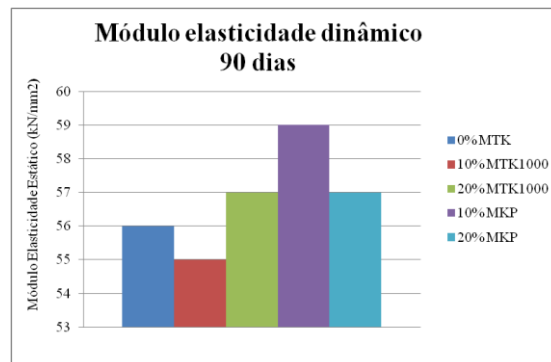


Gráfico 20 - Módulo de elasticidade dinâmico a 90 dias

No caso de betões com 90 dias de cura, o Gráfico 19 e o Gráfico 20 mostram um aumento generalizado do módulo de elasticidade dos betões face aos 28 dias, como seria de esperar. Relativamente ao betão sem adições, verifica-se uma pequena descida no módulo de elasticidade para o betão com 10% MTK1000. No caso dos restantes, todos eles apresentam um aumento do módulo de elasticidade com a adição de metacaulino, especialmente o betão com 10% MKP.

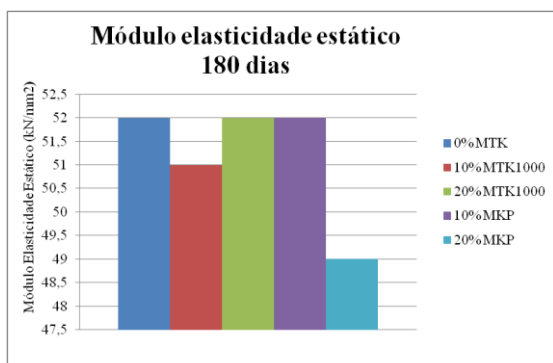


Gráfico 21 - Módulo elasticidade estático a 180 dias

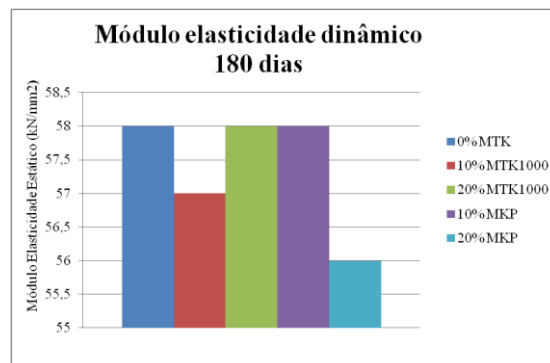


Gráfico 22 - Módulo elasticidade dinâmico a 180 dias

Os módulos de elasticidade estático e dinâmico a 180 dias estão apresentados no Gráfico 21 e Gráfico 22, respectivamente. Neste caso particular, todos os módulos de

elasticidade dos vários betões são semelhantes, com exceção do betão com 20% MKP que apresenta uma redução do módulo de elasticidade comparativamente aos restantes. Para este betão, existe também uma redução do módulo de elasticidade com o tempo, dos 90 para os 180 dias. Este fator, associado à redução da resistência à compressão, pode dever-se à instabilidade dos compostos formados pela reação entre o metacaulino e o cimento. O desaparecimento de certos compostos metaestáveis pode criar uma diminuição das características mecânicas, explicando o ocorrido com MKP com 20% de substituição (Gameiro et al, 2012).

6.3. Avaliação da penetração de cloretos no betão

Foi realizada uma análise comparativa da penetração de cloretos entre as várias composições de betão baseada nos resultados obtidos no ensaio de quantificação de cloretos por potenciometria. Após calibração, foram comparados os resultados em função da sua posição no provete, assim como do tipo de composição ensaiada.

6.3.1. Calibração

A calibração foi alcançada tendo em conta valores conhecidos de concentração de cloretos. Para concentrações de 5, 10, 50, 100, 500 e 1000 mg/l de cloretos numa solução aquosa, foram registados os valores correspondentes à força elétrica motriz (f.e.m.) em mV obtidos no analisador multi parâmetros. A

Tabela **19** mostra esses mesmos valores permitindo elaborar uma curva de calibração associada, Gráfico 23. Com esta curva de calibração, foi obtida uma função correspondente à linha de tendência desta, possibilitando quantificar os cloretos em mg/l pelos resultados obtidos em mV no analisador multi parâmetros.

Tabela 19 - Resultados calibração

Cloretos (mg/l)	f.e.m. (mV)
5	228
10	211
50	173
100	156
500	118
1000	100

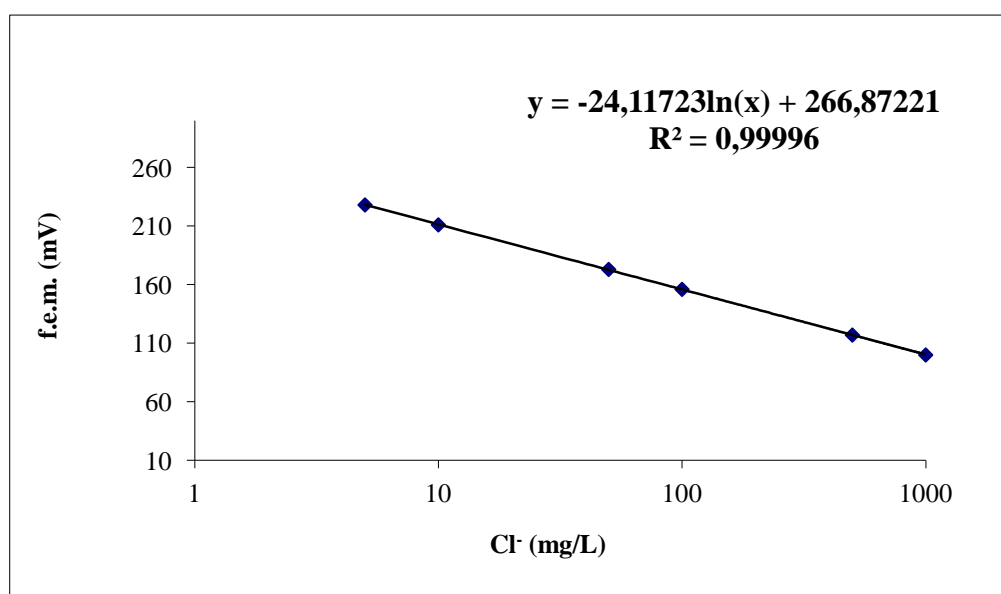


Gráfico 23 - Curva de calibração

6.3.2. Avaliação do teor de cloretos

Para cada uma das três fatias, interior, meio e exterior, foram ensaiadas três amostras de cada composição da zona central da fatia de betão. Para essas amostras foram registados os valores obtidos no analisador multi parâmetros e através da expressão fornecida pela calibração calculou-se a respectiva quantidade de cloretos em mg/l. Tendo em conta a quantidade de amostra usada, o tamanho do balão em que esta foi diluída e a toma dessa diluição, foi calculada a quantidade de cloretos em mg/kg de amostra. Calculou-se então a média dessas três amostras correspondentes a cada composição tal como mostra a Tabela 20.

Tabela 20 - Quantificação de cloretos na fatia interior

Fatia Interior								
Betão	Amostras	f.e.m. (mV)	Cl- (mg/L)	Toma (g)	Balão (ml)	Toma (ml)	Cl- (mg/kg)	Média Cl- (mg/kg)
0% MTK	21	243	2,7	5,16	500	50	260,7	264,14
	22	241	2,9	5,06	500	50	288,9	
	23	245	2,5	5,10	500	50	242,8	
10% MTK1000	25	245	2,5	5,07	500	50	244,2	165,77
	26	255	1,6	5,02	500	50	163,0	
	28	269	0,9	5,08	500	50	90,1	
20% MTK1000	9	232	4,2	5,02	500	50	422,9	674,03
	10	217	7,9	5,06	500	50	781,4	
	11	216	8,2	5,04	500	50	817,8	
10% MKP	13	214	9,0	5,11	500	50	876,3	831,02
	14	210	10,6	5,15	500	50	1026,3	
	15	224	5,9	5,01	500	50	590,4	
20% MKP	17	220	7,0	5,14	500	50	679,3	558,48
	18	218	7,6	5,02	500	50	755,7	
	19	245	2,5	5,15	500	50	240,5	

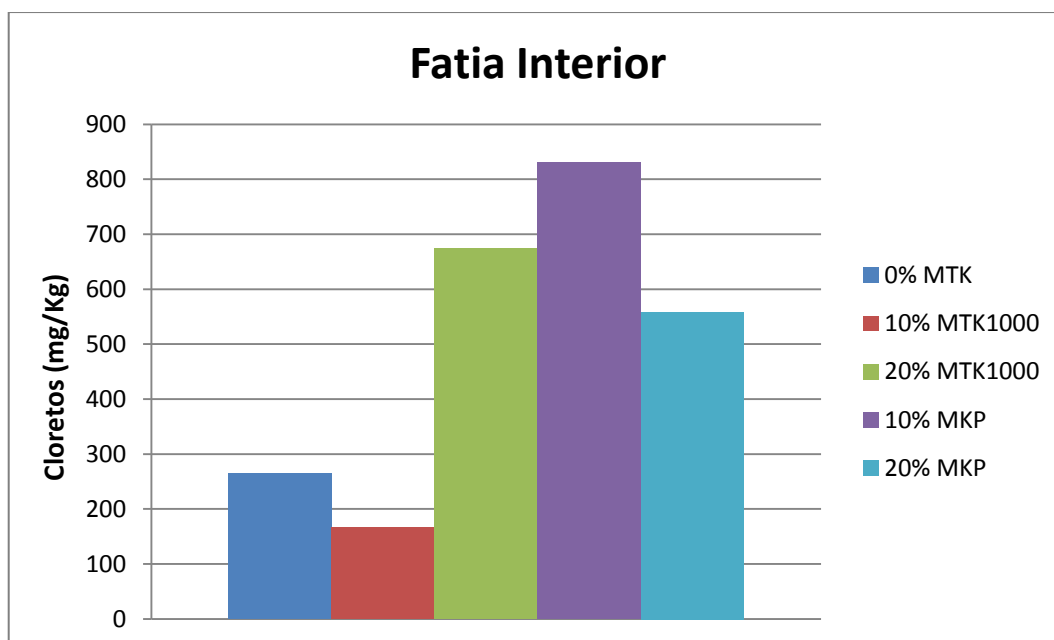


Gráfico 24 - Comparação de cloretos para diferentes composições na fatia interior

O Gráfico 24 mostra a comparação efetiva da quantidade de cloretos existente na fatia interior para cada uma das composições de betão ensaiadas. Sendo esta a fatia mais interior do cubo, é importante realçar a diminuição de 37% da quantidade de cloretos no betão com 10%MTK1000 em relação ao betão sem qualquer metacaulino. Para todas as restantes composições existe um teor de cloretos superior na zona central do betão.

A Tabela 21 mostra os resultados obtidos para a fatia do meio.

Tabela 21 - Quantificação de cloretos na fatia do meio

Fatia Meio								
Betão	Amostras	f.e.m. (mV)	Cl- (mg/L)	Toma amostra (g)	Balão (ml)	Toma (ml)	Cl- (mg/kg)	Média Cl- (mg/kg)
0% MTK	21	223	6,17	5,17	500	50	596,37	549,30
	22	224	5,92	5,14	500	50	575,48	
	23	229	4,81	5,05	500	50	476,06	
10% MTK1000	25	244	2,58	5,07	500	50	254,59	198,99
	26	247	2,28	5,01	500	50	227,50	
	28	263	1,17	5,11	500	50	114,89	
20% MTK1000	9	224	5,92	5,13	500	50	576,60	794,83
	10	216	8,24	5,03	500	50	819,39	
	11	211	10,14	5,13	500	50	988,50	
10% MKP	13	211	10,14	5,00	500	50	1014,20	954,13
	14	212	9,73	5,06	500	50	961,47	
	15	214	8,96	5,05	500	50	886,71	
20% MKP	17	215	8,59	5,10	500	50	842,35	603,65
	18	223	6,17	5,00	500	50	616,64	
	19	236	3,60	5,11	500	50	351,95	

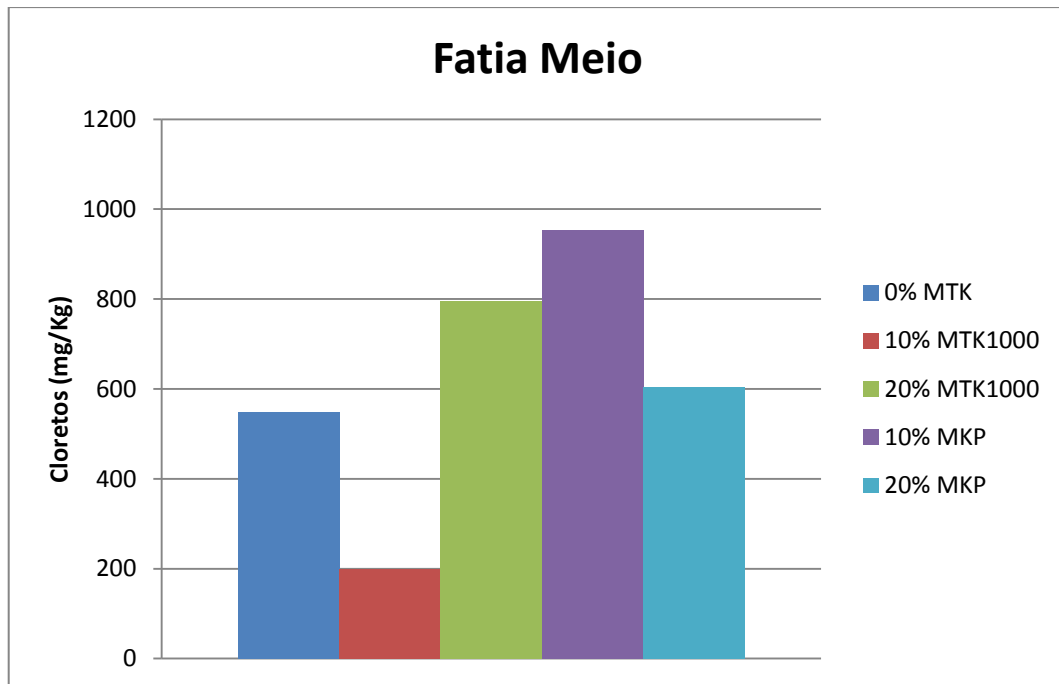


Gráfico 25 - Comparação de cloretos para diferentes composições na fatia do meio

No caso da fatia do meio, o Gráfico 25 apresenta resultados muito semelhantes aos verificados na fatia interior. O betão com 10% MTK1000 exibe uma diminuição significativa de 64% de teor de cloretos quando comparado ao betão sem metacaulino, enquanto que todos os outros apresentam um aumento do teor de cloretos, sendo este pouco relevante no caso do betão com 20% MKP.

Tabela 22 - Quantificação de cloretos na fatia exterior

Fatia Exterior								
Betão	Amostras	f.e.m. (mV)	Cl- (mg/L)	Toma amostra (g)	Balão (ml)	Toma (ml)	Cl- (mg/kg)	Média Cl ⁻ (mg/kg)
0% MTK	21	182	33,76	5,11	500	50	3302,90	2859,75
	22	186	28,60	5,02	500	50	2848,28	
	23	189	25,25	5,20	500	50	2428,06	
10% MTK1000	25	194	20,52	5,01	500	50	2048,27	1818,44
	26	196	18,89	5,13	500	50	1841,16	
	28	200	16,00	5,11	500	50	1565,88	
20% MTK1000	9	190	24,23	5,09	500	50	2379,78	2509,96
	10	186	28,60	5,17	500	50	2765,64	
	11	190	24,23	5,08	500	50	2384,47	
10% MKP	13	180	36,67	5,03	500	50	3645,56	3039,68
	14	190	24,23	5,04	500	50	2403,39	
	15	184	31,07	5,06	500	50	3070,09	
20% MKP	17	185	29,81	5,08	500	50	2933,80	2678,36
	18	189	25,25	5,06	500	50	2495,24	
	19	188	26,32	5,05	500	50	2606,03	

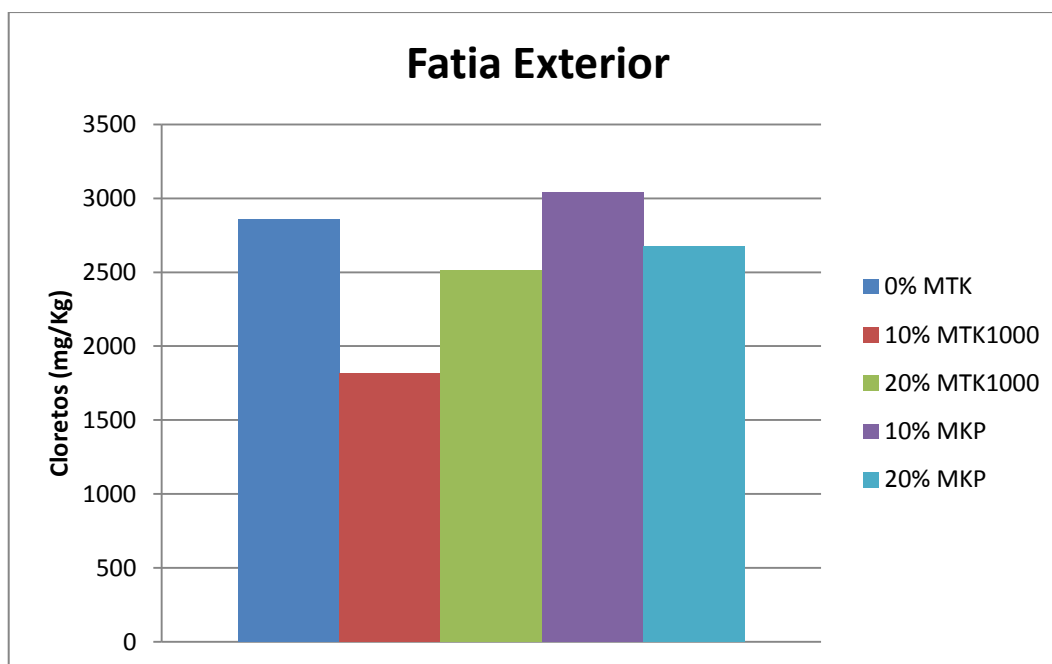


Gráfico 26 - Comparação de cloretos para diferentes composições na fatia exterior

A fatia exterior, tal como mostra o Gráfico 26, obteve resultados diferentes das fatias do meio e interior. Neste caso, comparando com o betão sem metacaulino, verifica-se uma diminuição do teor de cloretos de 36% para o betão com 10% MTK1000, de 12% para o betão com 20% MTK1000 e de 6% para o betão com 20% MKP. Apenas a composição com 10% MKP apresenta um pequeno aumento de 6% do teor de cloretos.

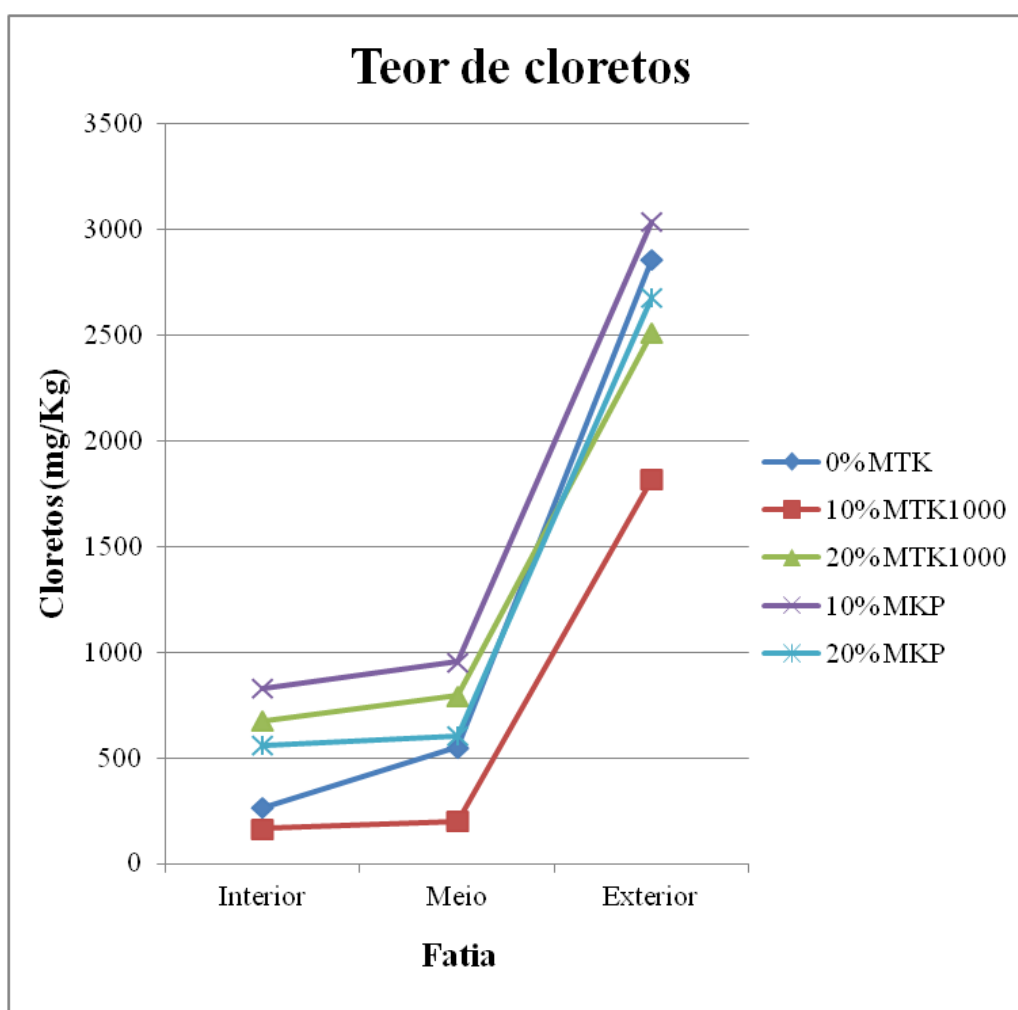


Gráfico 27 - Teor de cloretos por fatia

Da análise ao Gráfico 27, verifica-se um aumento do teor de cloretos à medida que se aproxima da parte exterior do cubo, tal como seria de esperar. Constata-se ainda uma grande diferença no aumento do teor de cloretos para a fatia exterior quando comparada às restantes fatias, podendo este facto ser explicado pela curta exposição de um mês à água do

mar sintética. Caso esta exposição fosse maior, era de prever um aumento da penetração de cloretos nas fatias do meio e interior.

Com os resultados obtidos neste ensaio, pode-se concluir que a única composição que foi realmente efetiva no abaixamento do teor de cloretos no betão foi com 10% MTK1000. Verificou-se também que a ação de MKP não teve qualquer efeito positivo na mitigação da penetração de cloretos.

7. Conclusão

O metacaulino é hoje um importante interveniente na construção civil. Este material proveniente da calcinação do caulino tem um uso alargado, principalmente na substituição parcial do cimento Portland. Esta permite a obtenção de algumas vantagens em termos energéticos, económicos, impacto ambiental e de desempenho, nomeadamente o aumento da resistência à compressão e flexão, redução de permeabilidade, aumento da durabilidade, maior trabalhabilidade e melhor aparência.

O trabalho efetuado permitiu concluir que os resultados obtidos na análise à resistência à compressão do betão foram bastante satisfatórios. Verificou-se uma melhoria significativa da resistência à compressão em todas as composições após substituição parcial do cimento por metacaulino. Esta melhoria constatou-se em todas as idades de cura, mas é de salientar a maior rapidez com que o betão com metacaulino atinge patamares de desempenho, principalmente a 28 e 90 dias de cura. O metacaulino português, tendo em conta que é um material experimental, obteve excelentes resultados na sua análise à resistência à compressão, nomeadamente a 28 e 90 dias, superando até os valores de resistência do metacaulino comercial francês. No entanto, registou-se uma perda de resistência para este metacaulino aos 180 dias quando comparado com os valores de 28 e 90 dias.

Da análise do módulo de elasticidade realizada neste estudo com base numa estimativa do Pundit, pode-se concluir que a adição de metacaulino no betão em substituição do cimento, permite obter módulos de elasticidade do betão ligeiramente maiores, quando comparados com betão sem metacaulino, para tempos de cura curtos como 28 dias. Neste caso, tal como na resistência à compressão, a adição de metacaulino português provocou um aumento do seu desempenho. Porém, nos resultados obtidos a 90 e 180 dias, este ensaio revelou diminuições do módulo de elasticidade para algumas composições com metacaulino, não sendo estas muito significativas. Em geral, pode-se concluir que com o aumento do tempo de cura, o módulo de elasticidade tende a ser semelhante para betões com ou sem metacaulino. A exceção será o betão com 20% de metacaulino português, que regista uma diminuição acentuada do módulo de elasticidade com o tempo, explicável devido ao desaparecimento de compostos meta-estáveis da reação pozolânica.

Avaliando os resultados obtidos ao teor de cloretos, conclui-se que apenas a composição com 10% MTK1000 alcançou resultados extremamente positivos em todas as partes do betão. Verificou-se que nas zonas mais interiores do betão, a mitigação de cloretos aumentou após adição de metacaulino português, no entanto, na zona exterior este apresenta valores muito idênticos aos obtidos para o betão sem metacaulino. Ressalva-se aqui o facto de o tempo de exposição de um mês à água do mar sintética ser manifestamente curto, podendo por isso os resultados não serem os mais desejáveis.

Deste estudo pode-se então concluir que a substituição parcial na ordem dos 10% ou 20% do cimento por metacaulino, permite que o betão adquira uma melhoria muito significativa no desempenho à resistência à compressão, sendo esta melhoria ainda maior aquando da adição de metacaulino português. Conclui-se também que este consegue chegar a patamares de desempenho geral muito mais rapidamente do que um betão sem metacaulino.

O presente trabalho permitiu confirmar todas as potencialidades do metacaulino referidas por autores anteriores. Todas essas mais valias estendem-se ao metacaulino português, podendo a sua comercialização ser uma verdadeira oportunidade.

Referências bibliográficas

Al-Akhras, Nabil M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. Cement and Concrete Research 36, ELSEVIER.

Bai, J., S. Wild and B. B. Sabir (2003). Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater. Cement and Concrete Research 33, Pergamon.

CNS Farnell (2003). Operating Instructions - PUNDIT 6.

Coutinho, A. Sousa (1988). Fabrico e Propriedades do Betão, L.N.E.C.

EN 12350-2 (2009) - Testing fresh concrete, Part 2: Slump test

Gameiro, A., Santos Silva, A., Veiga, R., Velosa, A. (2012) Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing, *Thermochimica Acta*, 535, pp. 36-41. DOI:10.1016/j.tca.2012.02.013

Gleize, Philippe J. P., Martin Cyr and Gilles Escadeillas (2007). Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes. Cement and Concrete Composites, ELSEVIER.

Gomes, Celso de Sousa Figueiredo (2002). Argilas, Aplicações na Indústria, Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Gonçalves, J. P., L. M. Tavares, R. D. Toledo Filho and E. M. R. Fairbairn (2009). "Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick." Construction and Building Materials.

Khatib, J. M. and R. M. Clay (2004). Absorption characteristics of metakaolin concrete. Cement and Concrete Research, Pergamon.

Lourenço, Jorge F., Eduardo J. M. O. Ferraz and João P. P. F. Coroado (2006). Metodologia para a determinação das vantagens de argamassas sob efeito pozolânico de metacaulinos.

Meira, João M. L. (2001). "Argilas: O que são, suas propriedades e classificações." VISA.

NP EN 206-1 (2007) - Betão, Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.

NP EN 1097-3 (2002) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios.

NP EN 1097-6 (2003) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água

NP EN 933-1 (2000) - Ensaaios das Propriedades Geométricas dos Agregados, Parte 1: Análise Granulométrica

NP EN 12390-3 (2009) - Ensaaios de Betão Endurecido

Pinto, Amândio Teixeira (2004). Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino. Engenharia Civil, Universidade do Minho. **Doutoramento**.

Qian, Xiaoqian and Zongjin Li (2001). The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. Cement and Concrete Research, Pergamon.

Sampaio, Elsa (2006). Mineralogia do Solo. Departamento de Geociências, Universidade de Évora.

Sampaio, Joaquim, J. Sousa Coutinho and M Noémia Sampaio (2001). Melhoria do desempenho de betões pelo metacaulino. 43º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto.

Siddique, Rafat and Juvas Klaus (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. Applied Clay Science, ELSEVIER.

Vasconcelos, Maria Cristina dos Santos Cerdeira e (2008). Caulino. Das origens às aplicações. Perspectivas para o século XXI. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. **Mestrado**.

www.lneg.pt

www.e-geo.ineti.pt

www.dep.state.fl.us

www.metakaolin.com

www.sika.pt